



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) 4 / 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)

РИНЦ:

- ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Свидетельство о регистрации СМИ:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) - ПИ ФС 77-83199 от 31.03.2022г.
Подписка:	Каталог интернет - подписки «Почта России» - индекс П6740
Сайт:	https://www.energyret.ru/
Издатель:	Казанский государственный энергетический университет
Адрес издателя:	420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Адрес редакции:	420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Тел./факс:	+7 (843) 527-92-76
Email:	problems_ener@mail.ru
Типография:	ООО "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, № 4**

Июль-Август

ISSN 1998–9903 (Print)

ISSN 2658-5456 (Online)

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

EDITORIAL BOARD:

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

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ГАТАУЛЛИН А.М., ГАВРИЛЕНКО А.Н., ПИСКОВАЦКИЙ Ю.В. Обзор современных методов защиты и диагностики состояния интеллектуальных систем электроснабжения	3
СИНЮКОВ А.В., СИНЮКОВА Т.В., ГРАЧЕВА Е.И., САФРОНОВ А.А. Разработка блока коррекции на базе нечеткой логики для системы управления механизмом перемещения груза мостового крана	30

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

КУЛИКОВ А.Л., СТАРШОВ И.С. Исследование диагностических параметров режима однофазных замыканий на землю в электросетях 10 кВ	42
ВИНОГРАДОВ А.В., ЛАНСБЕРГ А.А. Разработка способа и алгоритма защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ от коротких замыканий с использованием устройства секционирования	56
ЛЕВИН В.М., ЗЕЛЕНСКИХ А.А., ПЕТУШКОВ П.А. Усовершенствованный метод анализа дерева событий для обнаружения неисправностей в силовых трансформаторах	69
ОВСЯННИКОВ А.Г., ЖАРИЧ Д.С., ШВЕЦ Н.А. Сравнительный анализ метода контроля состояния изоляции по ультрафиолетовому излучению поверхностных частичных разрядов	82
ФРОЛОВ М.Ю. Оценка состояния режимных параметров синхронного генератора на основе фильтра Калмана	94

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

БАЙРАМОВ А.Н., МАКАРОВ Д.А., СЕДЕЛКИН В.М. Особенности электролиза воды высокого давления при оценке термодинамической эффективности комбинирования АЭС с водородным комплексом	104
ПАВЛОВ Г.И., СИТНИКОВ О.Р., НАКОРЯКОВ П.В. Об эффективности использования антинакипного устройства на паровом котле ДЕ-25-24	123
ВАЛИЕВ Р.Н. Сравнение эффективности вариантов реконструкции тепловой сети	135

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

ЮДИН А.К. Разработка энергетической модели дата-центра	147
--	-----

CONTENTS

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

GATAULLIN A.M., GAVRILENKO A.N., PISCOVATSKIY Y.V. Review of modern protection and diagnostics methods of intelligent power supply systems	3
SINYUKOV A.V., SINYUKOVA T.V., GRACHEVA E.I., SAFRONOV A.A. Development of a correction unit based on fuzzy logic for the control system of the load movement mechanism of an overhead crane	30

ELECTRIC POWER INDUSTRY

KULIKOV A.L., STARSHOV I.S. Study of mode recognition in 10 kV cable networks for organizing protection against single-phase ground faults	42
VINOGRADOV A.V., LANSBERG A.A. Development of a method for protecting rural 0.4 kV electrical networks from short circuits using a partitioning device and an algorithm for its implementation	56
LEVIN V.M., ZELENSKIH A.A., PETUSHKOV P.A. An advanced event tree analysis method for detecting faults in power transformers	69
OVSYANNIKOV A.G., ZHARICH D.S., SHVETS N.A. Comparative analysis of the method of insulation condition monitoring by ultraviolet radiation of surface partial discharges	82
FROLOV M.YU. State estimation of synchronous generator mode parameters based on Kalman filter	94

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

BAYRAMOV A.N., MAKAROV D.A., SEDELKIN V.M. Features of high-pressure water electrolysis in assessing the thermodynamic efficiency of combining nuclear power plants with a hydrogen complex	104
PAVLOV G.I., SITNIKOV O.R., NAKORYAKOV P.V. On the efficiency of using anti-scale device on steam boiler DE-25-24	123
VALIEV R.N. Comparison of the efficiency of options for the reconstruction of the heating network	135

THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

YUDIN A.K. Development of an energy model of a data center	147
--	-----

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.317.333

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-4-3-29

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

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

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

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в развитии интеллектуальных систем электроснабжения (ИСЭ), что подразумевает совершенствование существующих, внедрение и совершенствование современных защит, систем диагностики, мониторинга элементов высоковольтного электрооборудования (ВЭ). ЦЕЛЬ. Рассмотреть современные, а также пути развития и возможности интеграции систем защиты и диагностики кабельно-воздушных линий (КВЛ) ИСЭ. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи был проведен сравнительный анализ причин, которые приводят к срабатыванию защит КВЛ ИСЭ, недостатки защит и возможные пути их совершенствования. Были проанализированы современное состояние защит, диагностики, мониторинга КВЛ ИСЭ и пути их развития. В том числе рассмотрены перспективные методы диагностики изоляции, муфтовых соединений кабельных линий (КЛ) по характеристикам частичных разрядов (ЧР), скруток воздушных линий (ВЛ) по данным тепловизионного обследования. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье был проведен обзор существующих защит и систем диагностики элементов КВЛ ИСЭ высокого и среднего классов напряжения. Рассмотрены актуальные вопросы развития защит ИСЭ в том числе распределенной генерации в состав которых входят генераторы возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) для того, чтобы обеспечить бесперебойную поставку электроэнергии потребителям в системах распределенной генерации. Рассмотрены актуальные вопросы развития современных методов диагностики КВЛ до уровня систем мониторинга в том числе с применением методов тепловизионного обследования, диэлектрической импедансной спектроскопии (ИС), метода ЧР. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Развитие ИСЭ будет актуальной задачей еще длительное время. Наиболее перспективными защитами ИСЭ будут адаптивные защиты с применением искусственных нейронных сетей (ИНС), в которые будут интегрированы наиболее современные математические алгоритмы и методы диагностики, в первую очередь технологии «умных сетей» (Smart Grids), технология микросетей (Microgrids), метод независимых компонент (МНК), ЧР, тепловизионного обследования, электрической импедансной спектроскопии (ИС), диэлектрической спектроскопии (ДС).

Ключевые слова: системы релейной защиты и автоматики; интеллектуальные системы электроснабжения; умные сети; интеллектуальное электронное устройство; метод частичных разрядов; метод тепловизионного обследования; метод импедансной спектроскопии; метод акустической эмиссии; метод диэлектрической спектроскопии; искусственные нейронные сети; машинное обучение.

Для цитирования: Гатауллин А.М., Гавриленко А.Н., Писковацкий Ю.В. Обзор современных методов защиты и диагностики состояния интеллектуальных систем электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 3-29. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-3-29.

REVIEW OF MODERN PROTECTION AND DIAGNOSTICS METHODS OF INTELLIGENT POWER SUPPLY SYSTEMS

Gataullin A.M., Gavrilenko A.N., Piscovatskiy Y.V.

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

Abstract: *RELEVANCE* of the study lies in the development of intelligent power supply systems (IPS), which implies the improvement of existing, implementation and improvement of modern protection, diagnostic systems, monitoring of high-voltage electrical equipment (HVE) elements. *THE PURPOSE.* To consider modern state, as well as the ways of development and possibilities of integration of protection and diagnostic systems of cable-overhead lines (COL) of IPS. *METHODS.* For solving the problem, a comparative analysis of the reasons that lead to the operation the protection systems of the COL of IPS, their shortcomings and possible ways of their improvement were carried out. The current state of protection, diagnostics, monitoring of COL of IPS and the ways of their development were analyzed. In particular, promising methods for diagnosing insulation, coupling joints of cable lines (CL) according to the characteristics of partial discharges (PD), overhead lines (OL) elements according to the data of thermal imaging inspection were considered. *RESULTS.* The article provides an overview of existing protection and diagnostic systems for COL of IPS of high and medium voltage classes. The article is devoted to current issues protection development of ISE of distributed generation, which include renewable energy source (RES) generators, in order to prevent overvoltage and ensure uninterrupted power supply to consumers in distributed generation systems. The article considers current issues of development of modern methods of COL diagnostics up to the level of monitoring systems, including using thermal imaging survey methods, dielectric impedance spectroscopy (DIS), and the PD method. *CONCLUSION.* Development of ISE will be one of the main task for a long time. The most advanced ISE protections will be adaptive protections using artificial neural networks (ANN) in which be integrate the most modern mathematical algorithms and diagnostic methods, primarily smart grids technologies, microgrids technology, independent component method (ICM), PD methods, thermal imaging survey, electrical impedance spectroscopy (DIS), and dielectric spectroscopy (DS).

Keywords: relay protection and automation systems; prevention of power supply failures; intelligent electronic device; partial discharges method; thermal imaging survey method; electrical impedance spectroscopy; acoustic emission testing; dielectric response spectroscopy; neural networks; machine learning.

For citation: Gataullin A.M., Gavrilenko A.N., Piscovatskiy Y.V. Review of modern protection and diagnostics methods of intelligent power supply systems. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (4): 3-29. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-3-29.

Введение (Introduction)

Обеспечение бесперебойных поставок электроэнергии потребителям является одной из главных задач электроэнергетики [1-3]. В частности для «зеленой энергетики» создаются генерирующие мощности, электронные устройства и методы управления потоками электроэнергии нового поколения, которые увеличивают сложность электроэнергетических систем (ЭЭС) [4-6]. Поэтому одной из главных задач становится разработка эффективных методов защиты и диагностики для обеспечения непрерывного режима поставок электроэнергии при аварийных и плановых отключениях [7-9]. Статистические исследования показывают, что грозовая активность, ветер, мокрый снег и связанные с ними воздействия являются причиной неисправностей и ненормальных режимов работы распределительных сетей, что подчеркивает важность внедрения эффективных методов определения мест повреждений для их своевременного устранения. С точки зрения анализа причин около 50% отключений связаны с воздушными линиями (ВЛ) электропередачи, а остальная часть распределяется между КЛ электропередачи, трансформаторами и другими устройствами. В последнее время в связи с развитием ИСЭ значительно увеличилась частота отключений КЛ [10, 11]. Примерно 65% отключений на линиях высокого напряжения (ВН) и среднего напряжения (СН) вызваны

кратковременными неисправностями и заканчиваются успешным автоматическим повторным включением (АПВ). Оставшиеся 35% вызваны отказами, за которыми следуют неуспешные АПВ. Сегодня локализация поврежденных участков систем электроснабжения имеют успех в более 90% случаях. Это подчеркивает рост важности проблемы эффективного управления ИСЭ. В распределительных сетях со сложной взаимосвязанной топологией, точность определения мест повреждений имеет тенденцию к снижению. Поэтому всестороннее изучение основных методов диагностики и прогнозирования неисправностей на КВЛ и их внедрение становится весьма актуальным в связи с переходом от централизованной к так называемой распределенной генерации. Важно пояснить, что питающие сети относятся к высоковольтным элементам системы электроснабжения, соединяющие станции и подстанции (ПС) питающей сети, в то время как распределительные сети охватывают системы СН и низкого напряжения (НН), соединяя распределительные ПС с конечными пользователями. Далее рассмотрим перенапряжения и сверхтоки как наиболее частые явления, влияющие на нормальный режим поставки и распределения электроэнергии.

Анализ причин перенапряжений и сверхтоков

В случае перенапряжений [12] напряжение превышает номинальное расчетное значение. По характеру причин перенапряжения можно разделить на внутренние и внешние. Внешние перенапряжения в основном вызваны прямыми ударами молний, которые определяют так называемые перенапряжения атмосферного происхождения и характеризуются быстрым порядка наносекунд нарастанием фронта импульса и очень быстрыми переходными процессами. Часто их называют грозовыми импульсными перенапряжениями. Они могут повредить изоляцию ВЭ. По причине ухудшения свойств изоляции могут возникнуть короткие замыкания (КЗ), при которых в окружающую среду рассеивается большое количество энергии, что может привести к значительным повреждениям. Обычно, чтобы предотвратить разрушение изоляции ВЭ, их проектируют со значительным запасом прочности к перенапряжениям, в несколько раз превышающие номинальные значения. Микропроцессорные системы релейной защиты и автоматики (РЗА) и противоаварийной автоматики (ПА) ранних поколений имели такие недостатки, как низкая частота дискретизации, ограничения пропускной способности каналов связи (КС), что затрудняло точную и быструю обработку сигнала переходного процесса, сопровождающего перенапряжения. Сегодня, благодаря более высоким частотам дискретизации аналого-цифровых преобразователей (АЦП), развитию беспроводных КС [13] этот недостаток частично преодолен. Внутренние перенапряжения вызываются операциями замыкания и размыкания коммутационных аппаратов (КА), поэтому их называют коммутационными перенапряжениями. Они могут быть распознаны по быстрым изменениям потребляемой мощности, или по резонансным явлениям в сети, связанные с широким частотным спектром сигнала переходного процесса и поглощением его компонент элементами ВЭ. Наконец, скачки напряжения могут быть вызваны повреждениями, связанными с перекрытиями изоляции ВЛ. Эти перенапряжения могут превышать номинальные значения в несколько раз и, как правило, вызывают переходные процессы длительностью порядка миллисекунд, в течение которого необходимо распознать ситуацию и при необходимости осуществить оперативные переключения [14]. В случае сверхтоков сила тока превышает номинальное расчетное значение. В зависимости от причин их возникновения, сверхтоки можно разделить на постоянные, переходные и аварийные. Различают сверхтоки, вызванные кратковременными и постоянными перегрузками. Сверхтоки, вызванные кратковременными перегрузками, возникают в основном по причине пусковых токов синхронных двигателей, которые до десяти раз выше номинальных и длятся несколько секунд. Сверхтоки могут возникать при включении трансформаторов без нагрузки, что может вызывать токи до трех раз выше номинальных в течение короткого времени. Обе эти причины сверхтоков связаны с переходными явлениями, поэтому нецелесообразно отключать КВЛ по которой циркулирует сверхток для предотвращения аварийного отключения. Сверхтоки, вызванные постоянными перегрузками, возникают при дефиците мощности. Они подразумевают медленный нагрев проводников. В случае, когда тепловая перегрузка продолжается в течение длительного времени, необходимо отключить нагрузку. Смягчение последствий перегрузок особенно важно для ИСЭ и систем распределенной генерации [15]. В ИСЭ с наличием большого количества источников ВИЭ становится актуальной разработка новых систем защит [16, 17]. Сверхтоки, вызванные повреждениями, обычно возникают по причине случайного электрического контакта между двумя точками, находящимися под разными потенциалами, при этом образуются

так называемые контуры неисправностей, по которым циркулирует ток КЗ, который значительно превышает номинальное значение. Обычно КЗ может произойти по причине повреждением изоляции, вызванного случайными перекрытиями, дождем и перегревом вследствие длительных перегрузок, но чаще всего из-за перенапряжений, которые вызывают появление дуги между точками, находящимися под разным потенциалом. В зависимости от топологии и состава ИСЭ предлагаются различные алгоритмы защиты от КЗ и ненормальных режимов [18-20]. Эволюция систем электроснабжения подразумевает внедрение новых устройств РЗА и ПА. Например, в [21] обсуждается использование активного сверхпроводящего ограничителя тока КЗ с насыщающимся ферромагнитным сердечником для преобразования больших токов КЗ в ИСЭ. В настоящее время используется множество различных систем контроля и управления состоянием КВЛ, которые по их назначению можно разделить на системы защиты и диагностические. Первые фокусируются на аварийных событиях и приводят к отключению поврежденного участка. Это системы РЗА и ПА и системы нахождения мест повреждений [22]. С другой стороны, диагностические системы экспресс-диагностики и мониторинга направлены на предотвращение аварийных ситуаций [23].

Отличительные особенности систем защиты и диагностики КВЛ ИСЭ

Повреждения изоляции КВЛ могут привести к отключению потребителей. К защитным системам относятся системы РЗА, которые отключают поврежденный участок. После срабатывания защиты определяют место повреждения. Отключение поврежденного участка должно выполняться селективно с последующим АПВ, или АВР [24]. Эффективность системы защиты оценивается на принципах улучшения селективности, надежности, чувствительности и быстродействия [25]. С другой стороны, диагностические системы должны выявлять начальные признаки потерь функциональности ВЭ, чтобы предотвратить аварийные отключения системами РЗА и ПА. Обычно для этого требуется применение систем мониторинга и машинного обучения на основе ИНС. Например, для КЛ СН переход в аварийный режим сопровождается развитием дефектов в муфтах. При этом дефекты развиваются в три этапа: от нормального состояния, через частичную потерю свойств изоляции к полному разрушению изоляции, когда срабатывает система РЗА (рис. 1).

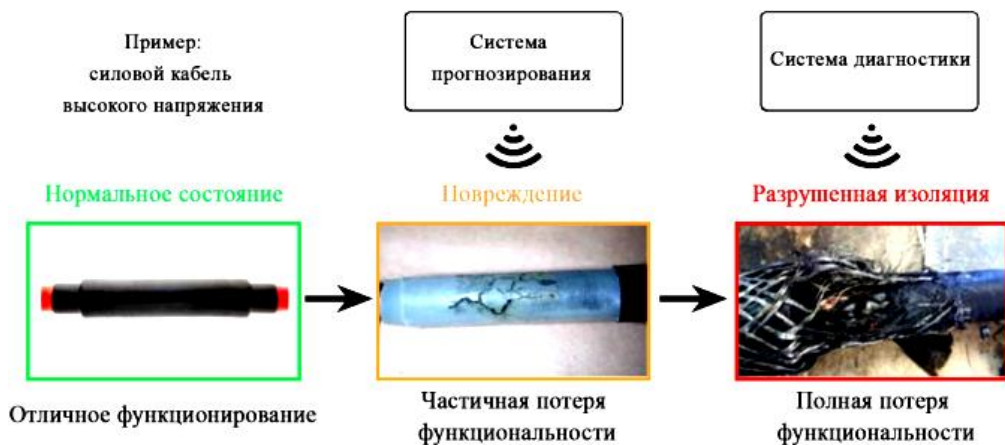


Рис. 1. Этапы развития дефекта промежуточной муфты кабеля среднего напряжения

Fig. 1. Stages of a defect development in the medium voltage cable intermediate coupling

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

Массовое внедрение ВИЭ потребует дальнейших разработок в области систем защиты и диагностики из-за возрастающей сложности современных ИСЭ. Фактически, наличие низковольтных установок, работающих в основном на фотоэлектрических (ФЭ) и ветровых генераторах, создает двунаправленные потоки энергии в распределительных сетях, которыми необходимо управлять для поддержания баланса мощностей в автоматическом режиме [26, 27]. При этом может произойти инверсия потока мощности на ПС питающих и распределительных сетей. Следовательно, становится необходимым внедрение новых методов дистанционного управления генераторами и диспетчерскими нагрузками, как и адаптация систем РЗА таким образом, чтобы они не производили нежелательных переключений, особенно если применяются блокчейн технологии с максимальным уровнем автоматизации [28, 29]. В этом контексте алгоритмы прогнозирования, анализа баланса производства и потребления электроэнергии на основе

ИНС позволяют предотвращать избыточные и ложные отключения [30]. Управляющие воздействия также необходимы для предотвращения каскадных (всерных) отключений по причине КЗ, а также для управления резервным питанием на основе ВИЭ [31, 32]. Современные автоматизированные системы телеметрии и управления технологическим процессом (АСУТП) производства и распределения электроэнергии используют алгоритмы прогнозирования для улучшения функциональных возможностей ИСЭ. Алгоритмы прогнозирования играют ключевую роль в оптимизации распределения электроэнергии, повышают эффективность АСУТП и помогают принятию оптимальных решений с точки зрения развития систем электроснабжения. Алгоритмы прогнозирования предполагают наличие модели спроса на электроэнергию, позволяя эффективно регулировать нагрузки и распределять ресурсы, в том числе связанные с персоналом. В ИСЭ алгоритмы прогнозирования являются неотъемлемой частью систем распределенной генерации на основе ВИЭ, таких как солнечная и ветровая, позволяя эффективно балансировать спрос и предложение. Кроме того, алгоритмы прогнозирования используются для составления графиков нагрузок, производства и потребления электроэнергии. Это позволяет оптимизировать использование электроэнергии в период и вне режима пиковой нагрузки, что приводит к экономии ресурсов и снижению негативного воздействия на окружающую среду. Интеграция алгоритмов машинного обучения в современные АСУТП еще больше повышает точность прогнозирования графиков нагрузки. Эти алгоритмы основаны на анализе собранных в течение длительного периода данных о погодных и других условиях для повышения эффективности прогнозирования. Это особенно полезно в сценариях работы микросетей (так называемых Microgrids), в которых источники генерации и потребители мощности меняются динамически. Подводя итог, можно сказать, что включение алгоритмов прогнозирования в различные системы управления энергоресурсами позволяет им принимать обоснованные решения, учитывать изменения спроса и предложения на электроэнергию и повышать общую эффективность и устойчивость работы системы электроснабжения. Кроме того, ВИЭ характеризуется высокой нестабильностью генерации, что создает проблемы в диспетчеризации [33, 34]. Фактически, мгновенный баланс между производством и потреблением мощности играет основополагающую роль в стабильности функционирования электроэнергетической системы, гарантируя отсутствие колебаний напряжения и частоты. В системах электроснабжения при дефиците мощности частота тока снижается и увеличивается при ее избытке. Защита от перегрузок, перенапряжений и колебаний частоты являются обязательными при подключении генераторов ВИЭ к ИСЭ [35]. При подключении генераторов ВИЭ может возникнуть скачок напряжения на шинах ПС питающей сети. Более того, поскольку производительность генераторов ВИЭ весьма изменчива, часто появляются скачки напряжения, которые необходимо сглаживать на ПС распределительной сети. Когда это явление возникает периодически в течение коротких промежутков времени, оно называется мерцающим эффектом. Это явление распознается системами диагностики по наличию гармонических искажений, источниками которых обычно являются нелинейные нагрузки и статические преобразователи, используемые для подключения генераторов ВИЭ к сети [36]. В [37] представлен подробный обзор методов мониторинга состояния систем электроснабжения. Большинство этих методов основаны на электрической рефлектометрии, представлен подробный обзор основных теоретических аспектов метода рефлектометрии во временной области, последовательной рефлектометрии во временной области, рефлектометрии во временной области с расширенным спектром, ортогональной многотональной рефлектометрии, рефлектометрии в области шума, рефлектометрии во временной области хаоса, бинарной рефлектометрии во временной области, рефлектометрии в частотной области, рефлектометрии с несколькими несущими и рефлектометрии в частотно-временной области. Однако лишь вкратце упоминается их возможное использование для прогнозирования момента развития дефектной структуры кабеля в аварийный режим. С этой точки зрения мониторинг методом ЧР вместе с методами определения мест повреждений с высоким импедансом и предотвращением дуговых разрядов (ДР) могут стать наиболее интересными разработками в ближайшем будущем [38]. Метод ЧР относится к прогностическим методам диагностики. В последнее время для обработки ЧР применяются искусственные нейронные сети (ИНС).

Системы защиты ИСЭ СН

В трехфазных системах переменного тока применяются векторные диаграммы токов и напряжений для выявления прямой, обратной и нулевой последовательностей, возникающих при повреждениях. При определенных конфигурациях векторных диаграмм

срабатывают функции РЗА. Устройства РЗА распределены по всей сети, поэтому их сложно скоординировать. Для распределительных сетей разработали специальный программный продукт SCADA (Supervisory control and data acquisition), объединяющий информацию от измерительных трансформаторов, электрических машинах, устройств РЗА в единый программно-аппаратный комплекс (ПАК) для управления и контроля распределенными системами электроснабжения [39]. Она представляет собой иерархическую структуру, которая объединяет региональные системы SCADA в SCADA стран и регионов. Первая работает на уровне распределения мощности, позволяя управлять двунаправленными потоками энергии и немедленно передавать в диспетчерскую информацию о любых изменениях положения КА и состоянии изоляции. Таким образом, имеется возможность координировать все системы РЗА и управлять с помощью реклоузеров распределением электроэнергии. Технология SCADA обладает значительным потенциалом для расширения возможностей умных городов по оптимизации своих распределительных сетей и инфраструктуры посредством Smart Grids. При организации Smart Grids необходимо следовать ряду национальных и международных технических стандартов. Это связано в том числе с большим количеством участников распределенной генерации и наличием у каждого из них систем РЗА, которые необходимо координировать. Управление распределением электроэнергии осуществляют региональные операторы распределительной системы. Подключение пассивных и активных пользователей к системе распределенной генерации требует установки систем РЗА [40, 41].

Системы защиты ИСЭ ВН

Высоковольтные КВЛ используются для передачи мощности от электростанций до ПС питающей сети. Топология такой системы может напоминать соты, или радиальной. Это сделано для оптимизации перетоков мощности и обеспечения непрерывного режима электроснабжения. При этом при определенных режимах часть этих участков может быть изолирована вследствие так называемого «островного эффекта». Большая часть оборудования, используемого в высоковольтных сетях, защищена с помощью систем РЗА и спроектирована с учетом критерия избыточности по пропускной способности и запасам мощности для обеспечения условий новых присоединений. Учитывая необходимость передачи мощности на большие расстояния, ИСЭ ВН, как правило, являются воздушными, в то время как КЛ (гораздо более дорогие) используются только в особых случаях. Основные элементы ВЛ электроснабжения защищены дифференциальными токовыми системами защиты. Ряд работ посвящено оптимизации защит в рамках разработки так называемых адаптивных систем РЗА. В [42] предложен смарт-сенсор контроля состояния степени насыщения магнитопровода измерительных трансформаторов с адаптацией параметров РЗА. Кроме того, рассматривается методология, основанная на синхронизированных векторных измерениях для защиты двупольных линий с компенсированной нейтралью. В [43] предлагается решение проблемы насыщения измерительных трансформаторов и связанной с ней проблемы избыточного срабатывания дифференциальной защиты силового трансформатора на основе локальной вычислительной сети (ЛВС) из измерителей тока специальной конструкции без эффекта насыщения.

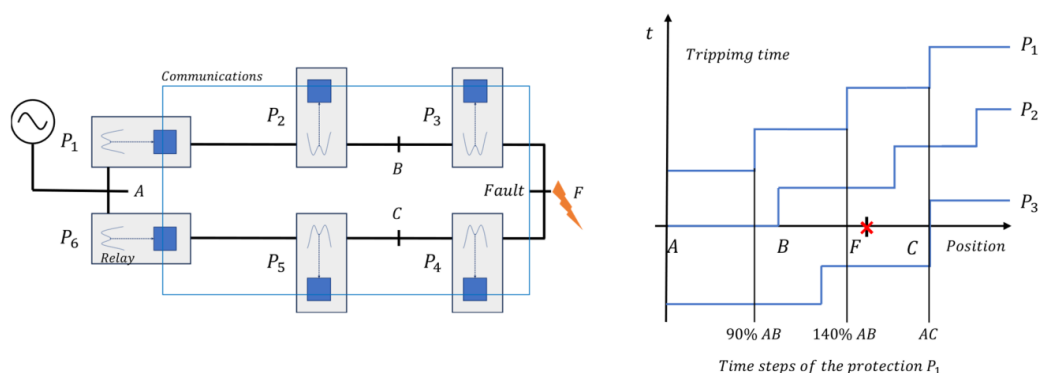


Рис. 2. Принцип работы дистанционной защиты на шести ПС питающей сети Fig. 2. The operation principle of distance protection on six substations of the feeding network

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

Внедрение синхронизации по GPS вносит сложность и повышает затраты на реализацию Smart Grids, тогда как использование синхронизации типа «точка-точка»

требует строгого задержек приема и передачи информации в канале связи. Для решения этих проблем предлагается защита линий на основе концепции так называемой дифференциальной защиты мощности [44]. Однако дифференциальные защиты не всегда селективны при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ). Для устранения этих недостатков предложен новый подход к дифференциальной защите, на основе теоремы Теллегена [45]. Этот подход сохраняет достоинства обычной дифференциальной токовой защиты, оставаясь при этом невосприимчивым к изменениям условий нагрузки и влиянию распределенной емкости в сетях сверхвысокого напряжения. Обычно для ВЛ электропередачи с двусторонним питанием резервной защитой является дистанционная защита (ДЗ). В отличие от ДФЗ ДЗ является защитой с относительной селективностью (рис. 2). ДЗ основана на зависимости импеданса линии от расстояния между источником мощности и места КЗ. ДЗ в отличие от ДФЗ как правило отключает линию с выдержками по времени, чтобы обеспечить селективность срабатывания защиты [25].

В [46] рассмотрен сверхбыстрый алгоритм защиты ДЗ, основанный на анализе первого фронта бегущих волн, возникающих при повреждениях. Алгоритм использует метод главных компонент для извлечения информации о внутренних и внешних повреждениях. Одними из ключевых вопросов, обсуждаемых и связанных с распределенной генерацией, являются кратковременные перенапряжения по причине неисправностей и потеря чувствительности защиты от сверхтоков для длинных фидеров. Несмотря на то, что ДЗ обычно используется на линиях электропередачи с двусторонним питанием, в [47] представлено возможное применение этих защит в распределительных сетях для решения некоторых проблем, связанных с интеграцией генераторов ВИЭ в систему распределенной генерации.

Системы защиты распределительных сетей ИСЭ

Распределительные сети могут быть разделены на линии СН и линии НН. Первые используются для соединения питающих и распределительных ПС. Распределительные сети связаны с потребителями электроэнергии. Разветвленная и сложная топология распределительных сетей СН требует быстрого определения места повреждения и включения резерва. Генераторы ВИЭ, которые питают распределительную сеть, вносят дополнительные сложности в вопросы управления ИСЭ [48]. В основном, в сетях СН основные функции защит выполняются с помощью реле максимального тока (РТ) в сочетании с автоматикой повторного включения (АПВ), предохранителями, секционными выключателями, в том числе вакуумными, давление в которых актуально контролировать в режиме мониторинга [49]. Это позволяет защитить линию от длительных сверхтоков и многофазных КЗ за счет селективного отключения поврежденного участка. Кроме того, применяя направленные токовые защиты, можно обнаружить ОЗЗ. Вышеупомянутые защиты от перегрузки по току играют основополагающую роль в повышении селективности систем РЗА. Селективность обеспечивается характерными для устройств максимальной токовой защиты (МТЗ) времятоковыми характеристиками, отличающиеся друг от друга углом наклона касательной. В результате мы можем скоординировать различные комплекты защит в зависимости от тока и времени. Для того чтобы избежать нежелательных последствий переходных процессов при коммутациях, функции автоматического включения резерва (АВР) и АПВ параметрируются таким образом, чтобы постепенно, ступенчато отключать и включать нагрузки. Таким образом, добиваются селективности срабатывания защит. В [50] эту задачу решают с помощью реклоузеров, встраивая их в традиционные сети. Применение реклоузеров позволяет лучше прогнозировать и оптимизировать поставки электроэнергии потребителям [51]. Этот тип управления реализован в современной SCADA для оптимизации работы сети и всех подключенных устройств, включая генераторы ВИЭ [52].

Системы диагностики ВЛ ВН ИСЭ

Чтобы избежать внезапных отключений, обычно проводят плановые визуальные и тепловизионные осмотры элементов ВЛ ВН. Для выполнения этих операций в том числе используются беспилотные аппараты, оснащенные тепловизионными камерами, проводятся осмотры с вертолетов. Основными объектами этих осмотров являются места соединений частей фазного провода. Такой тип осмотра может проводиться каждые два года, и проверка становится более частой для участков сети, расположенных в районах с неблагоприятными условиями окружающей среды [53]. Оценка состояния ВЛ ИСЭ в первую очередь основана на моделях механизмов износа, осмотрах и профилактических заменах ВЭ. Например, важным видом работ является осмотр высоковольтных опор и оценка ухудшения их свойств по причине коррозии [54]. В [55] представлена методология определения поврежденных жил в форме надразов и глубоких царапин. Что касается

алюминиевых жил, армированных сталью, лучше использовать базы данных для диагностики их состояния в связи с растянутым во времени процессом развития повреждений [56], что позволит более точно определять их остаточный ресурс [57]. ИСЭ не предполагают полного отказа от их обслуживания, что делает актуальным развитие эффективных методов прогнозирования дуговых замыканий при замене элементов ВЛ ВН без отключения приложенного напряжения [58]. Методы диагностики КЛ ВН аналогичны prognostic methods КЛ СН.

Системы диагностики КВЛ СН ИСЭ

Большая часть инфраструктуры линий СН состоит из КЛ, поэтому системы мониторинга в основном связаны с обнаружением неисправностей изоляции. Многие диагностические работы в настоящее время применяются при отключенном приложенном напряжении. На рисунке 3 показан механизм повреждения изоляции силового кабеля в процессе эксплуатации. Некоторая часть дефектов образуется уже на этапе производства кабелей. Дефектная структура развивается в процессе эксплуатации КЛ. В материале изоляции кабеля могут присутствовать примеси, концентрация которых может увеличиваться под воздействием изменения условий окружающей среды, механических повреждений, загрязнения, распада молекул изоляции кабеля. Когда дефектная структура нарушает защитную оболочку кабеля, это ускоряет процессы коррозии. Образуются так называемые водные триинги (water trees) и электрические триинги (electrical trees), направленные навстречу друг другу. Водные триинги связаны с движением молекул воды, которые будучи дипольными, увеличивают локальную напряженность электрического поля и вызывают электрические триинги. Электрические триинги обусловлены движением зарядов в воздушных вкраплениях (кавернах) диэлектрика. Электрические триинги приводят к локальному нагреву диэлектрика и образованию новых каверн вследствие разрыва молекулярных структур материала изоляции.

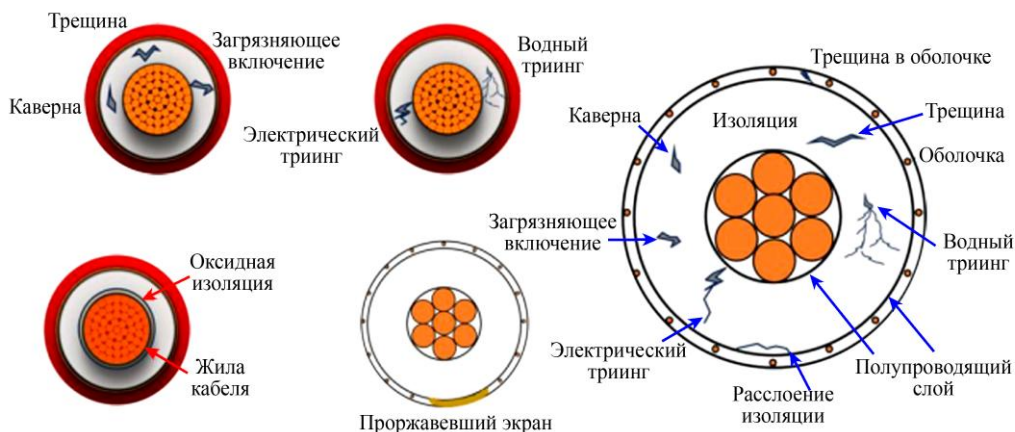


Рис. 3. Иллюстрация механизма разрушения изоляции силового кабеля в процессе эксплуатации

Fig. 3. Illustration of the destruction mechanism of the power cable insulation during operation

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

Метод ЧР является одним из основных методов неразрушающего контроля и мониторинга состояния КЛ [59, 60]. Развивают комплексные системы мониторинга кабельных линий [61]. Для экспресс-диагностики состояния различных элементов кабельных линий часто применяется метод тепловизионного обследования [62-64]. Электроимпедансная спектроскопия (ИС) является методом неразрушающего контроля, связанная с измерением импеданса изоляции кабеля в зависимости от частоты [65]. Метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на анализе акустических волн в процессе эксплуатации КЛ, может дать информацию о потерях эластичности изоляции кабеля [66, 67]. Метод диэлектрической спектроскопии (ДС) может дать информацию о состоянии изоляции КЛ среднего напряжения [68, 69]. ЧР – это разновидность искрового разряда, который происходит в ограниченной области изоляционного материала в местах повышенных значений напряженности локального электрического поля. Иногда ЧР называют микродугой. Характеристики ЧР могут дать информацию о дефектах, поэтому метод ЧР широко используется в диагностике состояния изоляции. ЧР могут возникать в любом оборудовании с дефектами изоляции различного типа, включая газовую, масляную или твердую. Необходимо принимать профилактические меры для уменьшения

негативного воздействия ЧР. Трансформаторы и распределительные устройства с газовой изоляцией (КРУЭ) являются одними из наиболее изученных с точки зрения диагностики методом ЧР [70]. Изоляция КВЛ СН и ВН также подвержены негативному воздействию ЧР [71]. Экспресс-тестирование методом ЧР может быть эффективно выполнено с использованием датчиков ультравысокой частоты (УВЧ) электромагнитного излучения (ЭМИ). Системы онлайн-мониторинга по характеристикам ЧР находятся на стадии разработки ввиду ряда нерешенных проблем [72]. В настоящее время активно развивают методы мониторинга КЛ постоянного тока, в том числе с жилами из высокотемпературных сверхпроводников, основанные на анализе характеристик ЧР [73]. Для эффективной диагностики КЛ, необходимо различать коронные ЧР от поверхностных ЧР (ПЧР), которые часто связаны с загрязнением поверхности изоляторов [74] и внутренних ЧР [75]. ПЧР часто возникают на границах раздела различных элементов муфт кабеля [76, 77]. Внутренние ЧР наиболее хорошо изучены и их связывают с разрушением изоляции [78]. Для количественного описания характеристик ЧР применяют модель многослойной изоляции [79]. Также известны статистические модели анализа характеристик ЧР [80]. При этом рассматриваются недостатки модели многослойной изоляции, связанной с непостоянством емкости дефекта [81]. Для решения этой проблемы в [82] предложена модель индуцированного ЧР заряда. Для уменьшения интенсивности и негативного влияния ЧР на изоляцию промежуточных и концевых муфт КЛ, возможным решением является специальное дополнение конструкции муфт в форме конуса, изготовленного из диэлектрического материала, способного снижать напряженность электрического поля. Для описания распространения ЧР, кабель рассматривают в разных моделях как систему с сосредоточенными, или с распределенными параметрами в зависимости от длины кабеля. Модели сосредоточенных параметров [83], Бержерона [84] и частотно-зависимая модель [85] являются тремя наиболее известными для описания распространения ЧР в силовом кабеле. Эти модели применяются для составления схем замещений, расчетов при определении места повреждения в одножильном силовом кабеле. Для многожильных кабелей модель описания распространения ЧР более сложная [86]. Метод ЧР по сути дополняет метод электрической рефлектометрии для определения места повреждения в КЛ [87, 88]. Методы тепловизионного обследования основаны на регистрации и анализе вторичного ЭМИ, обусловленного ЧР, в инфракрасном (ИК) диапазоне частотного спектра. При этом строятся тепловизионные изображения, или их последовательности в пространстве и времени для изучения волновых процессов и идентификации дефектов [89]. Метод ИС основан на измерении зависимости комплексного сопротивления, емкости кабеля в зависимости от частоты [90, 91]. Метод АЭ заключается в анализе состояния изоляции кабеля по характеристикам звуковых колебаний, обусловленных ЧР, записанные ультразвуковым микрофоном. При этом наиболее эффективно проводить диагностику изоляции силового трансформатора, сочетая метод АЭ с анализом характеристик ЧР в высокочастотной (ВЧ) и УВЧ области ЭМИ. Метод ДС по сути является частью метода ИС. Метод ИС, как правило, применяется для определения остаточного ресурса кабелей по зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от частоты. При этом частота приложенного напряжения меняется в пределах от 0.1 МГц до 100 Гц. В [92] было показано, что диэлектрические потери на концевых муфтах кабеля выше по сравнению с промежуточными и был сделан вывод о том, что концевые муфты быстрее разрушаются по причине влаги и ЧР. Многие перспективные методы диагностики связаны с применением нескольких моделей и типов ИНС, например, для определения мест повреждений [93] и ДЗ [94]. При этом часто применяют МНК, который является важным инструментом оптимизации, особенно при работе со сложными многомерными наборами данных, множеством признаков повреждений для их классификации, преобразуя их в новый набор независимых друг от друга параметров, называемых главными компонентами. МНК уменьшает сложность набора данных, сохраняя при этом наиболее значимую информацию, что ускоряет вычислительный процесс, но снижает возможности переобучения моделей ИНС при появлении новых признаков повреждений. МНК помогает создать более обобщенную и надежную модель, сосредоточившись на основных закономерностях данных. Кроме того, МНК полезен в тех случаях, когда исходные характеристики повреждений имеют общие причины, но проявляют себя по-разному. МНК решает эту проблему, преобразует исходные характеристики в линейно некоррелированные компоненты [95-97].

Основные перспективные разработки защит ИСЭ

ДЗ использовалась в течение многих десятилетий, но в настоящее время может потребоваться ее адаптация к новой конфигурации электрической системы. Например, в

[98] исследована надежность ДЗ линий постоянного тока морских ветровых установок, а в [99] предлагается новое дистанционное реле на основе оценки реактивного сопротивления линии. Координация ДЗ играет фундаментальную роль в селективном отключении поврежденного участка линии. Поскольку обычные ДЗ не работают селективно в случае параллельных линий из-за взаимного влияния цепей и нулевой последовательности, несколько статей предлагают адаптивные схемы для решения этой проблемы [100, 101]. Предлагаемая схема динамически корректирует уставки на основе определенных входных сигналов для учета эффекта взаимного влияния цепей. Используя эти дополнительные входные величины для настройки защиты, предлагаемый подход значительно улучшает чувствительность ДЗ параллельных линий. Те же принципы можно применить для дифференциальной защиты линий, шин, силовых трансформаторов и другого высоковольтного оборудования [102, 103]. Для увеличения эффективности дифференциальной защиты применяют ИНС [104]. В некоторых ситуациях в качестве резервной по отношению к ДЗ применяется МТЗ без выдержки по времени (токовая отсечка) [21]. Некоторые из наиболее важных разработок в области широкомасштабного мониторинга, защиты и управления в настоящее время связаны с внедрением алгоритмов искусственного интеллекта в системы РЗА. Например, для анализа данных, полученных при синхронизированных векторных измерениях (СВИ) используют ИНС [105]. При этом для решения задач оптимизации расположения модулей СВИ применяют специальные математические алгоритмы [106]. Как правило, целевые функции этих задач оптимизации определяют минимальное количество и оптимальное положение точек измерения [107-110]. Кроме того, в этих задачах предполагается, что сеть связи обладает достаточной пропускной способностью, но это условие может не выполняться на практике. Недавно в алгоритм оптимизации была включена задача размещения линии связи, что обеспечило наблюдаемость всей системы [111]. Основные новые разработки в области защит ИСЭ СН касаются городских сетей. Основной целью с точки зрения автоматизации является мониторинг состояния элементов сети и управление системами защит различного поколения, в том числе электромеханическими. Такая координация позволяет локализовать неисправный участок в сложной системе электроснабжения. Высокая степень автоматизации ИСЭ по сравнению с традиционными сетями достигается за счет достаточного для отделения поврежденного участка распределительной сети количества реклоузеров, что позволяет не отключать ПС питающей сети при любых повреждениях. При этом поврежденный участок ИСЭ определяется централизованно, чего не было доступно в сетях более ранних поколений. Дальнейший шаг к развитию распределительных сетей заключается во внедрении интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ), способных взаимодействовать друг с другом с помощью цифровых протоколов, таких как МЭК 61850 [112, 113]. В сетях, управляемых с помощью ИЭУ, координация между защитами осуществляется специальными командами блокировок, предотвращающих избыточное срабатывание защит смежных участков. Это делается для того, чтобы на какое-то время изолировать поврежденный участок ИСЭ. Тот же принцип распространяется на ИСЭ СН и НН. Для реализации этого принципа в каждом случае динамически формируется виртуальная сеть из ИСЭ в соответствии с топологией системы электроснабжения [114]. Когда в ИСЭ возникает повреждение, каждое ИЭУ в зоне защиты этого участка будет обмениваться друг с другом файлом, содержащим информацию о векторных конфигурациях токов и напряжений. В этом сценарии алгоритмы защиты распознают ситуацию и адаптируются путем сравнения данных до и после определенных событий. Результаты моделирования подтверждают, что предлагаемый метод способен быстро и точно определять неисправность. Он очень чувствителен к различным типам междуфазных замыканий и может надежно работать даже в ИСЭ различной топологии. В случае распределенной генерации с большим количеством генераторов ВИЭ некоторые исследователи считают наиболее перспективным решением топологию microgrids [116]. В частности, предлагаются адаптивные защиты, основанные на различных вычислительных методах и ИНС, метаэвристические алгоритмы, алгоритмы нечеткой логики, параллельной работы ИНС нескольких типов и другие для решения задач оптимизации ИСЭ. Например, в [117], для поиска наилучшего положения устройств модулей СВИ и достижения полной наблюдаемости распределительной сети применяется метаэвристический алгоритм. Алгоритмы управления распределительными сетями не должны приводить к полной их изоляции от всей сети за счет применения адаптивных алгоритмов защиты [118]. Использование ИЭУ улучшает функции защиты элементов распределительной сети, но в тоже время приводит к появлению проблем, связанные с необходимостью построения

сложных в обслуживании КС [119], кибербезопасностью [120] и управлением режимами станций [121].

Основные перспективные разработки систем диагностики ИСЭ

Прогнозирование остаточного ресурса является одной из основных областей исследований, в которой активно применяются ИНС. Например, в [122] для оценки остаточного ресурса и предотвращения выхода из строя фотоэлектрических преобразователей постоянного тока используется интеллектуальный классификатор. В [123] предлагаются решения на базе ИНС для мониторинга линий электропередачи. В [124] обсуждается использование ИНС для прогнозирования времени бесперебойной работы ИСЭ. Немаловажную роль в работе КЛ ВН играют муфтовые соединения, о состоянии которых можно судить по температуре, которую сложно контролировать в режиме мониторинга ввиду того, что кабели ВН располагаются под землей. Дополнительные сложности связаны с влиянием нагрузки и солнечной радиации, влияющие на изменения температуры. В [125, 126] представлены перспективные методы оптимизации тепловизионных методов диагностики, связанные с изменениями условий окружающей среды, в частности скорости ветра. В [127] предложена модель для исследования взаимосвязи сопротивления и температуры соединительных гильз и скруток фазного провода ВЛ, муфтовых соединений КЛ. В [128] предложено комплексное исследование оценки состояния скруток, болтовых соединений ВЛ на основе тепловизионной диагностики и оценки состояния муфт КЛ на основе данных импульсной рефлектометрии. Можно сделать вывод, что измерения импеданса в местах неоднородностей ВЛ и КЛ могут свидетельствовать о признаках разрушения материала, которые становятся причиной отражения ЧР, диагностических импульсов и искажения их формы. Анализ характеристик этих сигналов может дать информацию относительно состояния материала скруток и муфт. В [129] предложен метод определения состояния муфт КЛ в режиме мониторинга, основанный на сравнении характеристик поврежденных с аналогичными параметрами неповрежденных муфт. Для сравнения этих параметров в [130] предложена эквивалентная схема болтовых соединений на основе сосредоточенных параметров: омического сопротивления, индуктивности и электрической емкости. Исследователи пришли к выводу, что процессы окисления материала болтовых соединений и скруток связаны с изменениями омического сопротивления, а частичный разрыв скруток связан с изменениями значений индуктивности и электрической емкости. Для оценки изменений частотных компонент диагностического и отраженных импульсов применяют алгоритмы машинного обучения на основе ИНС [131]. Технология обучения моделей ИНС для оценки остаточного ресурса муфт и болтовых соединений может быть очень сложной, поэтому требует оптимизации, например, на основе методики предварительной локализации поврежденного участка [132, 133]. Как правило, проблемы КЛ СН связаны с разрушением изоляции, процесс которого ускоряется при проникновении влаги в муфтовые соединения кабеля [134] и высокими температурами окружающей среды в период с июля по август, когда по статистике происходит до 60 % повреждений, обусловленных ухудшением состояния муфтовых соединений [135]. Для оценки повреждений КЛ СН на ранней стадии их развития, применяют модель КЛ с распределенными параметрами [136]. При этом повреждения в схеме замещения распознаются ИНС по изменениям величин удельной проводимости и емкости [137, 138] (рис. 4).

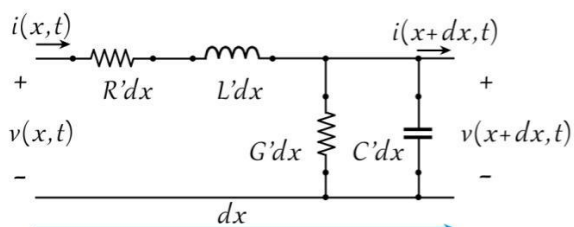


Рис. 4. Схема замещения кабеля СН

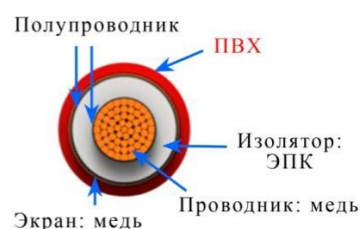


Fig. 4. Medium voltage cable replacement scheme

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

Подобный метод рассмотрен в [139], где изменения импеданса КЛ СН оцениваются по искажению формы инжектируемого диагностического импульса, формируемого PLC модемами систем РЗА. В [140] теоретическая модель диагностики КЛ на основе схемы замещения с распределенными параметрами опробована на практике с применением метода импульсной рефлектометрии и метода ЧР [141, 142].

Сравнение преимуществ и недостатков различных систем мониторинга ИСЭ

Для регистрации и анализа характеристик ЧР на КЛ можно использовать множество различных методов, но вопрос их применения в режиме онлайн по-прежнему остается открытым по причине шумов, помех и изменений условий регистрации ЧР. Ввиду огромной протяженности и разветвленности КЛ до настоящего времени не решена проблема локализации мест повреждений методом ЧР в режиме онлайн без инжектирования в кабель диагностических импульсов. Метод ЧР признан одним из самых инновационных методов диагностики для обеспечения надежности управления ИСЭ. Для повышения эффективности остаточного ресурса кабеля в [143] обсуждаются алгоритмы оценки в режиме мониторинга величин кажущегося заряда ЧР, частоты следования ЧР, изменения концентрации зарядов и обнаружения мест повреждений на КЛ 10 кВ при наличии кабелей с бумажно-масляной изоляцией, XLPE кабелей с соответствующими им муфтовыми соединениями различного типа. Что касается математического аппарата, для решения задач оптимизации систем защиты и диагностики, поиска мест повреждений в распределительных сетях, применяются генетические алгоритмы [144], алгоритмы нелинейного программирования [145], волновой метод [146], алгоритмы адаптивной дифференциальной эволюции [147]. В [148, 149] с помощью генетических алгоритмов предлагают координировать комплекты МТЗ. Работы [150, 152] посвящены применению ИНС для определения мест повреждений в распределительных сетях. Та же задача в [153] решается с помощью алгоритмов нечеткой логики, а в [154-156] с помощью генетических алгоритмов. В [157, 158] рассматривается применение ИНС для нахождения мест повреждений на ВЛ. В [160] предлагается для решения этой же задачи совместно применять генетический алгоритм и ИНС. Что касается метода ЧР, он эффективен для мониторинга состояния ИСЭ, но сложен в реализации. Кроме того, до настоящего времени не решены фундаментальные причины изменения характеристик ЧР и их взаимосвязи с состоянием ВЭ. Метод тепловизионного обследования также как и метод ЧР является неразрушающим и полезен для экспресс-диагностики повреждений кабеля и его муфтовых соединений. Его недостатки заключаются в невозможности выявления внутренних дефектов и дефектов, которые не связаны с избыточным выделением тепла. Метод тепловизионного обследования в существенной степени зависит от факторов окружающей среды таких как температура и влажность. При этом проведение полевых испытаний требует специализированного оборудования и квалифицированного персонала. Метод АЭ также является неразрушающим методом диагностики и позволяет анализировать дефекты внутри кабеля, но существенно зависит от шумов, а для работы в режиме мониторинга требуется специализированное оборудование. Кроме того, он может быть недостаточно чувствительным при слабых сигналах АЭ. Наконец, метод ДС также является неразрушающим методом оценки состояния изоляции кабелей, однако, подобно ИС, на ее результаты могут влиять изменения температуры и влажности. Кроме того, для эффективной реализации ДС требуется применение высоковольтного источника низкочастотного переменного напряжения.

Заключение (Conclusions)

Можно сказать, что мониторинг ИСЭ играет основополагающую роль в обеспечении бесперебойного электроснабжения и эта задача будет актуальной еще долгое время. Можно сказать, что наиболее перспективным из математических методов обработки данных с целью своевременного выявления повреждений ИСЭ являются ИНС. ИНС также могут быть полезны в системах мониторинга состояния ИСЭ в режиме онлайн. Для масштабирования систем мониторинга необходимо применять типовое оборудование, в том числе типовые КС РЗА. Решение задачи оптимизации КС обмена диагностической информацией по линиям электропередачи с результатами измерений частотных характеристик электромагнитных и тепловых импульсов будет иметь важное значение в ближайшем будущем для разработки систем мониторинга, способных эффективно функционировать в режиме онлайн. Таким образом, разработка технологий мониторинга в режиме онлайн на основе интеграции алгоритмов искусственного интеллекта в существующие системы и комплексы, в том числе в системы РЗА является ключевой задачей для повышения надежности современных ИСЭ и интеллектуальных городов. Как упоминалось в этой статье, направление развития методов мониторинга ИСЭ с применением ИНС направлено на увеличение их эффективности и адаптивности. Новые технологии стимулируют переход к динамически формируемым в реальном режиме времени моделям, которые помогают операторам сетей управлять и оптимизировать процесс распределения энергии. Ключевой тенденцией является интеграция технологии обработки больших данных с применением алгоритмов

искусственного интеллекта. Эти технологии позволяют осуществлять диагностику и обслуживание элементов ИСЭ на ранней стадии обнаружения неисправностей и динамическую балансировку нагрузки. Алгоритмы машинного обучения всесторонне анализируют различные наборы данных, формируя критерии оценки состояния ИСЭ для повышения надежности и эффективности поставок электроэнергии. Современные системы мониторинга предназначены для быстрого обнаружения и реагирования на сбои, киберугрозы и стихийные бедствия. Современные требования предполагают интеграцию систем диагностики, систем РЗА для создания так называемых самовосстанавливающихся ИСЭ в том числе с применением генераторов ВИЭ. Методы мониторинга и управления развиваются таким образом, чтобы адаптироваться к изменчивости солнечной и ветровой энергии и обеспечить бесперебойную поставку электроэнергии высокого качества в должном объеме. Интеллектуальные датчики и системы управления играют важную роль в ИСЭ распределенной генерации. По сути, будущее систем и методов мониторинга ИСЭ заключается в увеличении вычислительных ресурсов на основе искусственного интеллекта и интеллектуальных технологий для создания гибких, устойчивых и надежных энергетических сетей. Можно сделать вывод, что в ближайшем будущем наиболее важным в области разработок новых систем РЗА станет решение задачи оптимизации обмена информацией для лучшей координации систем РЗА питающих и распределительных сетей, сложность которых с каждым годом растет, для предотвращения ложных, избыточных срабатываний и аварийных режимов вследствие небаланса мощностей. Этот аспект будет иметь решающее значение для оптимального управления при массовой интеграции генераторов ВИЭ и предотвращения их полного отключения от ИСЭ (так называемый «островной эффект»), обеспечивая доступность качественной электроэнергии потребителям. Для достижения этой цели распространение технологии SCADA будет играть фундаментальную роль. В то же время необходимо обеспечивать целостность SCADA, качество, полноту и своевременность передачи данных, собираемых и передаваемых SCADA. Кибербезопасность и конфиденциальность также должны быть приоритетными задачами, защищая системы связи и сети от несанкционированного доступа, вмешательства или саботажа. Кроме того, следует обеспечивать совместимость и координацию систем SCADA с различными протоколами и платформами. Наконец, должны быть рассмотрены вопросы масштабируемости и гибкости адаптации систем и архитектур SCADA к меняющимся и растущим потребностям и запросам ИСЭ и интеллектуальных городов. Важной задачей является чтобы большинство функций защиты реализовывались непосредственно ИЭУ на основе серверных вычислений.

Литература

1. Dewangan F., Abdelaziz A.Y., Biswal M. Load Forecasting Models in Smart Grid Using Smart Meter Information: A Review // *Energies*. 2023. Vol.16. pp. 1404.
2. Al-Saadi M., Al-Greer M., Short M. Reinforcement Learning-Based Intelligent Control Strategies for Optimal Power Management in Advanced Power Distribution Systems: A Survey // *Energies*. 2023. Vol. 16. pp. 1608.
3. Hussain S., El-Bayeh C.Z., Lai C., Eicker U. Multi-Level Energy Management Systems Toward a Smarter Grid: A Review // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. pp. 71994–72016.
4. Rind Y.M., Raza M.H., Zubair M., et al. Smart Energy Meters for Smart Grids an Internet of Things Perspective // *Energies*. 2023. Vol. 16. pp. 1974.
5. Simion C.-P., Verdeş C.-A., Mironescu A.-A., et al. Digitalization in Energy Production Distribution and Consumption: A Systematic Literature Review // *Energies*. 2023. Vol. 16. pp. 1960.
6. Mahela O.P., Khosravy M., Gupta N., et al. Comprehensive overview of multi-agent systems for controlling smart grids // *CSEE J. Power Energy Syst.* 2022. Vol. 8. pp. 115–131.
7. Fabrício M.A., Behrens F.H., Bianchini D. Monitoring of Industrial Electrical Equipment Using IoT // *IEEE Lat. Am. Trans.* 2020. Vol. 18. pp. 1425–1432.
8. Wang S., Zhou L., Wang T., et al. Fast protection strategy for DC transmission lines of MMC-based MT-HVDC grid // *Chin. J. Electr. Eng.* 2021. Vol. 7. pp. 83–92.
9. Jiang J.-A., Chiu H.-C., Yang Y.-C., et al. On Real-Time Detection of Line Sags in Overhead Power Grids Using an IoT-Based Monitoring System: Theoretical Basis, System Implementation, and Long-Term Field Verification // *IEEE Internet of Things Journal*. 2022. Vol. 9, N15. pp. 389–395.
10. Klyushkin N.G., Lachugin V.F. A Statistical Overview of Fault Location Methods and Problems in Calculating and Locating Faults in 110 kV (and Higher) Power Transmission Lines // *Power Technol. Eng.* 2020. Vol. 54. pp. 250–254.

11. Chen B. Fault Statistics and Analysis of 220-kV and above Transmission Lines in a Southern Coastal Provincial Power Grid of China // IEEE Open Access J. Power Energy. 2020. Vol. 7. pp. 122–129.
12. Ebtsam A. H., Bishoy E. S., Ebrahim A. B. Impact and assessment of the overvoltage mitigation methods in low-voltage distribution networks with excessive penetration of PV systems: A review // *Electrical Energy Systems*. 2021. Vol. 31, N12. pp. 1–31.
13. Probst F.L., Beltle M., Tenbohlen S. Measurement of Transient Overvoltages by Capacitive Electric Field Sensors // *Sensors*. 2024. Vol. 24, N5 pp. 1357. <https://doi.org/10.3390/s24051357>
14. Reddy S.A., Kumari M.S. A review of switching overvoltage modeling in UHV AC transmission lines // *Electric Power Systems Research*. 2024. Vol. 236 pp. 110902. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110902>
15. He Q., Ding L., Kong Z.-M., et al. Distributed Scheme for Line Overload Mitigation with Linearized AC Power Flow // *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*. 2022. Vol. 69. pp. 2877–2881.
16. Zhang X., Wang X., Li Z., et al. Optimization of Impedance-Accelerated Inverse-Time Over-Current Protection Based on Improved Quantum Genetic Algorithm // *Energies*. 2023. Vol. 16. pp. 1119.
17. Ding Z., Yu K., Wang C., et al. Transmission Line Overload Risk Assessment Considering Dynamic Line Rating Mechanism in a High-Wind-Penetrated Power System: A Data-Driven Approach // *IEEE Trans. Sustain. Energy*. 2022. Vol. 13. pp. 1112–1122.
18. Al Talaq M., Al-Muhaini M. Optimal Coordination of Time Delay Overcurrent Relays for Power Systems with Integrated Renewable Energy Sources // *Energies*. 2022. Vol. 15. pp. 6749.
19. Foqha T., Khammash M., Alsadi S. Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Hybrid Firefly–Genetic Algorithm // *Energies*. 2023. Vol. 16, N14. pp. 5328.
20. Hong L., Rizwan M., Wasif M., et al. User-Defined Dual Setting Directional Overcurrent Relays with Hybrid Time Current-Voltage Characteristics-Based Protection Coordination for Active Distribution Network // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. pp. 62752 – 62769.
21. Li B., Li C., Guo F., et al. Overcurrent Protection Coordination in a Power Distribution Network with the Active Superconductive Fault Current Limiter // *IEEE Trans. Appl. Supercond*. 2014. Vol. 24. pp. 1–4.
22. Rajesh P., Kannan R., Vishnupriyan J., et al. Optimally detecting and classifying the transmission line fault in power system using hybrid technique // *ISA Transactions*. 2022. Vol. 130. pp. 253–264.
23. Kordestani M., Saif M., Orchard M.E., et al. Failure Prognosis and Applications—A SurveyRecent Literature // *IEEE Trans. Reliab*. 2021. Vol. 70. pp. 728–748.
24. Nazir M.I.; Hussain I.; Ahmad A., et al. A. System Modeling and Reliability Assessment of Microgrids: A Review // *Sustainability*. 2022. Vol. 14, N1. pp. 126.
25. Escobar J.J.M., Matamoros O.M., Padilla R.T., et al. A Comprehensive Review on Smart Grids: Challenges and Opportunities // *Sensors*. 2021. Vol. 21, N21. pp. 6978.
26. Nabatirad M., Razzaghi R., Bahrani B. BahraniAutonomous power balance in hybrid AC/DC microgrids // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2023. Vol. 146. pp. 108752.
27. Gallegos J., Arévalo P., Montaleza C., et al. Sustainable Electrification—Advances and Challenges in Electrical-Distribution Networks: A Review // *Sustainability*. 2024. Vol. 16, N2. pp. 698.
28. Jamil F., Iqbal N., Imran, et al. Peer-to-Peer Energy Trading Mechanism Based on Blockchain and Machine Learning for Sustainable Electrical Power Supply in Smart Grid // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. pp. 39193–39217.
29. Wang Y., Zhang D., Li Y., et al. Enhancing Power Grid Resilience With Blockchain-Enabled Vehicle-to-Vehicle Energy Trading in Renewable Energy Integration // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2024. Vol. 60, N2. pp. 2037 – 2052.
30. Shams M. H., Niaz H., Hashemi B., et al. Artificial intelligence-based prediction and analysis of the oversupply of wind and solar energy in power systems // *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 250. pp. 114892.
31. Qiu M. Study on Isolated Island Detection Technology of Distributed PV Grid System. 2023 Asia-Europe Conference on Electronics, Data Processing and Informatics (ACEDPI); 17-19 April 2023; Prague, Czech Republic. IEEE; 2023. pp. 539–544.
32. Mishra A., Jena P. A Scheduled Intentional Islanding Method Based on Ranking of Possible Islanding Zone // *IEEE Trans. Smart Grid*. 2021. Vol. 12. pp. 1853–1866.
33. Succetti F., Rosato A., Araneo R., et al. Challenges and Perspectives of Smart Grid Systems in Islands: A Real Case Study *Energies* // *Energies*. 2023. Vol. 16, N2. pp. 583.
34. Li X., Wang L., Yan N., et al. Cooperative Dispatch of Distributed Energy Storage in Distribution Network with PV Generation Systems // *IEEE Trans. Appl. Supercond*. 2021. Vol. 31. pp. 1–4.
35. Ding T., Wang Z., Qu M., et al. A Sequential Black-Start Restoration Model for Resilient Active Distribution Networks // *IEEE Trans. Power Syst*. 2022. Vol. 37. pp. 3133–3136.
36. Zhao J., Zhang Q., LIU Z., et al. A Distributed Black-Start Optimization Method for Global Transmission and Distribution Network // *IEEE Trans. Power Syst*. 2021. Vol. 36. pp. 4471–4481.

37. Furse C.M., Kafal M., Razzaghi R., et al. Fault Diagnosis for Electrical Systems and Power Networks: A Review // *IEEE Sens. J.* 2021. Vol. 21. pp. 888–906.
38. Han C., Gao K., Changet W., et al. Research on the Evolution Mechanism of Partial Discharge Signals for Arcing Faults in Transformers // *IEEE Access.* 2025. Vol. 13. pp. 8023–8031.
39. Jakaria A.H.M., Rahman M.A., Gokhale A. Resiliency-Aware Deployment of SDN in Smart Grid SCADA: A Formal Synthesis Model // *IEEE Trans. Netw. Serv. Manag.* 2021. Vol. 18. pp. 1430–1444.
40. Majeed A.A., Altaie A.S., Abderrahim M. et al. A Review of Protection Schemes for Electrical Distribution Networks with Green Distributed Generation // *Energies.* 2023. Vol. 16, N22. pp. 7587.
41. Bui D.M., Le P.D., Nguyen T.P., et al. An Adaptive and Scalable Protection Coordination System of Overcurrent Relays in Distributed-Generator-Integrated Distribution Networks // *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11, N18. pp. 8454.
42. Martínez-Figueroa G.d.J., Córcoles-López F., Bogarra S. FPGA-Based Smart Sensor to Detect Current Transformer Saturation during Inrush Current Measurement // *Sensors.* 2023. Vol.23, N2. pp. 744.
43. Peng F., Gao H., Huang J., et al. Power Differential Protection for Transformer Based on Fault Component Network // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2023. Vol. 38. pp. 2464–2477.
44. Darwish H.A., Taalab M.I., Ahmed E.S. Investigation of power differential concept for line protection // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2005. Vol. 20. pp. 617–624.
45. Liu S., Wang B., Zhao Y., et al. Novel Differential Protection Approach of UHV AC Transmission Lines Based on Tellegen's Quasi-Power Theorem // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2022. Vol. 37. pp. 1264–1274.
46. Vazquez E., Castruita J., Chacon O.L., et al. A New Approach Traveling-Wave Distance Protection—Part I: Algorithm // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2007. Vol. 22. pp. 795–800.
47. Sinclair A., Finney D., Martin D., et al. Distance Protection in Distribution Systems: How It Assists with Integrating Distributed Resources // *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2014. Vol. 50. pp. 2186–2196.
48. Prenc R., Rojnić M., Franković D., et al. On the Development of Overcurrent Relay Optimization Problem for Active Distribution Networks // *Energies.* 2022. Vol. 15. pp. 6528.
49. Węgierek P., Kostyla D., Lech M. Directions of Development of Diagnostic Methods of Vacuum Medium-Voltage Switchgear // *Energies.* 2023. Vol. 16, N5. pp. 2087.
50. Torres B.S., Borges da Silva L.E., Salomon C.P., et al. Integrating Smart Grid Devices into the Traditional Protection of Distribution Networks // *Energies.* 2022. Vol. 15, N7. pp. 2518.
51. Bindi M., Piccirilli M.C., Luchetta A., et al. A Comprehensive Review of Fault Diagnosis and Prognosis Techniques in High Voltage and Medium Voltage Electrical Power Lines // *Energies.* 2023. Vol. 16, N 21. pp. 7317.
52. Guillén-López D., Serrano-Guerrero X., Barragán-Escandón A., et al. Transient and Steady-State Evaluation of Distributed Generation in Medium-Voltage Distribution Networks // *Energies.* 2024. Vol. 17, N 22. pp. 5783.
53. Li Z., Zhang Y., WuH., Suzuki S., et al. Design and Application of a UAV Autonomous Inspection System for High-Voltage Power Transmission Lines // *Remote Sens.* 2023. Vol. 15, N 3. pp. 865.
54. Bindi M., Piccirilli M.C., Luchetta A., et al. A Comprehensive Review of Fault Diagnosis and Prognosis Techniques in High Voltage and Medium Voltage Electrical Power Lines // *Energies.* 2023. Vol.16, N 21. pp. 7317.
55. Liao C., Yi Y., Chen T., et al. Detecting Broken Strands in Transmission Lines Based on Pulsed Eddy Current // *Metals.* 2022. Vol. 12, N6. pp. 1014.
56. Rondineau A., Gaillet L., Dieng L., et al. Degradation of Steel Wires in Bimetallic Aluminum–Steel Conductors Exposed to Severe Corrosion Conditions // *Corros. Mater. Degrad.* 2022. Vol. 3, N4. pp. 646–660.
57. Jurkiewicz B., Smyrak B. Studies on the Evolution of Fatigue Strength of Aluminium Wires for Overhead Line Conductors // *Materials.* 2024. Vol. 17, N11. pp.2537.
58. Gao J., Wang L., Wu S., et al. Prediction of Breakdown Voltage of Equipotential Live-Line Work Air Gaps in Transmission Lines: A Computational Discharge Model // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility.* 2022. Vol. 64, N 6., pp. 1932–1940.
59. Govindarajan S., Morales A., Ardila-Rey J.A., et al. A review on partial discharge diagnosis in cables: Theory, techniques, and trends // *Measurement.* 2023. Vol. 216. pp. 112882.
60. Zhang X., Pang B., Liu Y., et al. Review on Detection and Analysis of Partial Discharge along Power Cables // *Energies.* 2021. Vol. 14. pp. 7692.
61. Song Y., Chen W., Wan F., Zhang Z., et al. Online multi-parameter sensing and condition assessment technology for power cables: A review // *Electric Power Systems Research.* 2022. Vol. 210. pp. 108140.
62. Szczegielniak T., Kusiak D., Jabłoński P. Thermal Analysis of the Medium Voltage Cable // *Energies.* 2021. Vol. 14. pp. 4164.

63. Balakrishnan G.K., Yaw C.T., Koh S.P., et al. A Review of Infrared Thermography for Condition-Based Monitoring in Electrical Energy: Applications and Recommendations // *Energies*. 2022. Vol. 15, N16. pp. 6000.
64. Shams F., Omar M., Usman M., et al. Thermal Imaging of Utility Power Lines: A Review. In *Proceedings of the 2022 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*; 27–28 October 2022; Kuala Lumpur, Malaysia; 2022. pp. 1–4.
65. Mo S., Zhang D., Li Z., et al. The Possibility of Fault Location in Cross-Bonded Cables by Broadband Impedance Spectroscopy // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2021. Vol. 28. pp. 1416–1423.
66. Ciaburro G., Iannace G. Machine-Learning-Based Methods for Acoustic Emission Testing: A Review // *Appl. Sci.* 2022. Vol. 12, N20. pp. 10476.
67. Witos F., Olszewska A., Opilski Z., et al. Application of Acoustic Emission and Thermal Imaging to Test Oil Power Transformers // *Energies*. 2020. Vol. 13. pp. 5955.
68. Werelius P., Tharning P., Eriksson R., et al. Dielectric spectroscopy for diagnosis of water tree deterioration in XLPE cables // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2001. Vol. 8. pp. 27–42.
69. Nadolny Z. Electric Field Distribution and Dielectric Losses in XLPE Insulation and Semiconductor Screens of High-Voltage Cables // *Energies*. 2022. Vol. 15, N 13. pp. 4692.
70. Sikorski W., Walczak K., Gil W., et al. On-Line Partial Discharge Monitoring System for Power Transformers Based on the Simultaneous Detection of High Frequency Ultra-High Frequency and Acoustic Emission Signals // *Energies*. 2020. Vol. 13. pp. 3271.
71. Rybarz J., Borucki S., Kunicki M., et al. Influence of the Cable Accessories Installing Method on the Partial Discharge Activity in Medium Voltage Cables // *Energies*. 2022. Vol. 15. pp. 4216.
72. Rosle N., Muhamad N. A., Rohani M. N. K. H., et al. Partial Discharges Classification Methods in XLPE Cable: A Review // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. pp. 133258–133273. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3115519.
73. Li Y., Jiang L., Xie M., et al. Advancements and Challenges in Power Cable Laying // *Energies* 2024. Vol. 17, N12. pp. 2905.
74. Maraaba L., Al-Soufi, K., Ssennoga T., et al. Contamination Level Monitoring Techniques for High-Voltage Insulators: A Review // *Energies*. 2022. Vol. 15. 7656.
75. Иванов Д.А. Особенности мониторинга сверхбольших частичных разрядов в высоковольтных. // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022. Т. 24. № 1. С.151–163. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-1-151-163>.
76. Hoduń P., Borecki M. Reliability Assessment of MV Power Connections // *Energies*. 2021. Vol. 14. 6965.
77. Barbieri L., Villa A., Malgesini R., et al. An Innovative Sensor for Cable Joint Monitoring and Partial Discharge Localization // *Energies*. 2021. Vol 14, N14. pp. 4095.
78. Albarracin R., Rodriguez-Serna J.M., Masud A.A. Finite-element-analysis models for numerical simulation of partial discharges in spherical cavities within solid dielectrics: A review and a novel method // *High Volt.* 2020. Vol. 5. pp. 556–568.
79. Rahman M.A., Saha A., Ghassemi M. Optimized Fabrication Process and PD Characteristics of MVDC Multilayer Insulation Cable Systems for Next Generation Wide-Body All-Electric Aircraft // *Energies*. 2024. Vol. 17, N12. pp. 3040.
80. Choudhary M., Shafiq M., Kiitam I., et al. Investigation of partial discharge characteristics in XLPE cable insulation under increasing electrical stress // *Engineering Failure Analysis*. 2024. Vol. 158. pp. 108006. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108006>.
81. Mcallister I.W. Electric field theory and the fallacy of void capacitance // *IEEE Trans. Electr. Insul.* 1991. Vol. 26. pp. 458–459.
82. Crichton G.C., Karlsson P.W., Pedersen A. Partial discharges in ellipsoidal and spheroidal voids // *IEEE Trans. Electr. Insul.* 1989. Vol. 24. pp. 335–342.
83. Mami M.S., Köksal M. Remark on the lumped parameter modeling of transmission lines // *Electr. Mach. Power Syst.* 2000. Vol. 28. pp. 565–575.
84. Suyaroj N., Premrudeepreechacharn S., Watson N.R. Transient state estimation with the Bergeron transmission line model // *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* 2017. Vol. 25. pp. 806–819.
85. Abdullah H., Uwe S. A full frequency-dependent cable model for the calculation of fast transients // *Energies*. 2017. Vol. 10. pp. 1158.
86. Wagenaars P., Wouters P., van der Wielen P.C.J.M., et al. Measurement of transmission line parameters of three-core power cables with common earth screen // *IET Sci. Meas. Technol.* 2010. Vol. 4. pp. 146–155.
87. Du Z., Willett P.K., Mashikian M.S. Performance limits of PD location based on time-domain reflectometry // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 1997. Vol. 4. 182–188.

88. Robles G., Shafiq M., Martínez-Tarifa J.M. Multiple Partial Discharge Source Localization in Power Cables through Power Spectral Separation and Time-Domain Reflectometry // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2019. Vol. 68. pp. 4703–4711.
89. Snell J., Renowden J. Improving results of thermographic inspections of electrical transmission and distribution lines. 2000 IEEE ESMO—2000 IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction Operation and Live-Line Maintenance Proceedings. ESMO 2000 Proceedings. Global ESMO 2000; 8–12 October 2000; The Pow, Montreal, QC, Canada. 2000 IEEE: Piscataway, NJ, USA; 2000. pp. 135–144.
90. Ohki Y., Yamada T., Hirai N. Diagnosis of cable aging by broadband impedance spectroscopy. 2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena; 16–19 October 2011; Cancun, Mexico; 2011. pp. 24–27.
91. Zhou Z., Zhang D., He J., et al. Local degradation diagnosis for cable insulation based on broadband impedance spectroscopy // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2015. Vol. 22. pp. 2097–2107.
92. Avellan A., Werelius P., Eriksson R. Frequency domain response of medium voltage XLPE cable terminations and its influence on cable diagnostics. Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.00CH37075); 5 April 2000; Anaheim, CA, USA; 2000. pp. 105–108.
93. Yong H., Minyou C., Jinqian Z. High impedance fault identification method of the distribution network based on discrete wavelet transformation. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering; 16–18 September 2011; Yichang, China; 2011. pp. 2262–2265.
94. Li W., Liu Y., Li Y., et al. Series Arc Fault Diagnosis and Line Selection Method Based on Recurrent Neural Network // IEEE Access. 2020. Vol. 8. pp. 177815–177822.
95. Ding S., Zhang P., Ding E., et al. On the application of PCA technique to fault diagnosis // Tsinghua Sci. Technol. 2010. Vol. 15. pp. 138–144.
96. Chen H., Jiang B., Lu N., et al. Deep PCA Based Real-Time Incipient Fault Detection and Diagnosis Methodology for Electrical Drive in High-Speed Trains // IEEE Trans. Veh. Technol. 2018. Vol. 67. pp. 4819–4830.
97. Zhao H., Zheng J., Xu J., et al. Fault Diagnosis Method Based on Principal Component Analysis and Broad Learning System // IEEE Access. 2019. Vol. 7. pp. 99263–99272.
98. Zolfaghari M., Chabanlo R.M., Abedi M., et al. A Robust Distance Protection Approach for Bulk AC Power System Considering the Effects of HVDC Interfaced Offshore Wind Units // IEEE Syst. J. 2018. Vol. 12. pp. 3786–3795.
99. Nengling T., Chen C. A New Weak Fault Component Reactance Distance Relay Based on Voltage Amplitude Comparison // IEEE Trans. Power Deliv. 2008. Vol. 23. pp. 87–93.
100. Liang Y., Li W., Lu Z., et al. A New Distance Protection Scheme Based on Improved Virtual Measured Voltage // IEEE Trans. Power Deliv. 2020. Vol. 35. pp. 774–786.
101. Hu Y., Novosel D., Saha M.M., et al. An adaptive scheme for parallel-line distance protection // IEEE Trans. Power Deliv. 2022. Vol. 17. pp. 105–110.
102. Wang Y., Wang Y., Ma N., et al. Waveform-Similarity-Based Protection Scheme for AC Transmission Lines of MMC-HVDC System with Offshore Wind Farms // Energies. 2022. Vol. 15. pp. 9107.
103. Wang Q., Ma J., Shang L., et al. Analysis of the Effects of Grid-Connected Charging/Discharging Stations on Relay Protection // Energies. 2022. Vol. 15. pp. 9065.
104. Bakkar M., Bogarra S., Córcoles F., et al. Artificial Intelligence-Based Protection for Smart Grids // Energies. 2022. Vol. 15. pp. 4933.
105. Milosevic B., Begovic M. Nondominated sorting genetic algorithm for optimal phasor measurement placement. 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491); 13–17 July 2003; Toronto, ON, Canada; 2003. pp. 69–75.
106. Xu J., Wen M.H.F., Li V.O.K., et al. Optimal PMU placement for wide-area monitoring using chemical reaction optimization. 2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT); 24–27 February 2013; Washington, DC, USA; 2013. pp. 1–6.
107. Reddy K.S.K., Rao D.A.K., Kumarraja A., et al. Implementation of Integer Linear Programming and Exhaustive Search algorithms for optimal PMU placement under various conditions. 2015 IEEE Power Communication and Information Technology Conference (PCITC); 15–17 October 2015; Bhubaneswar, India; 2015. pp. 850–855.
108. Huang L., Sun Y., Xu J., et al. Optimal PMU Placement Considering Controlled Islanding of Power System // IEEE Trans. Power Syst. 2014. Vol. 29. pp. 742–755.
109. Chatterjee S., Saha Roy B.K., Ghosh P.K. Optimal Placement of PMU Considering Practical Costs in Wide Area Network. 2017 14th IEEE India Council International Conference (INDICON); 15–17 December 2017; Roorkee, India; 2017. pp. 1–6.

110. Manousakis N.M., Korres G.N. Optimal Allocation of Phasor Measurement Units Considering Various Contingencies and Measurement Redundancy // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2020. Vol. 69. 3403–3411.
111. Zhu X., Wen M.H.F., Li V.O.K., et al. Optimal PMU-Communication Link Placement for Smart Grid Wide-Area Measurement Systems // *IEEE Trans. Smart Grid.* 2019. Vol. 10. pp. 4446–4456.
112. Wojtowicz R., Kowalik R., Rasolomampionona D.D. Next Generation of Power System Protection Automation—Virtualization of Protection Systems. // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2018. Vol. 33. 2002–2010.
113. Kumar S., Abu-Siada A., Das N., et al. Reverse Blocking Over Current Busbar Protection Scheme Based on IEC 61850 Architecture // *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2023. Vol. 59. pp. 2225–2233.
114. Ma J., Ma W., Yan X., et al. A New Adaptive Backup Protection Scheme Based on Intelligent Electronic Devices // *Can. J. Electr. Comput. Eng.* 2015. Vol. 38. pp. 77–88.
115. Ma J., Ma W., Yan X., et al. A New Adaptive Voltage Protection Scheme for Distribution Network with Distributed Generations // *Can. J. Electr. Comput. Eng.* 2013. Vol. 36. pp. 142–151.
116. Barra P.H.A., Coury D.V., Fernandes R.A.S. A survey on adaptive protection of microgrids and distribution systems with distributed generators // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020. Vol. 118. pp. 109524.
117. Laouamer M., Kouzou A., Mohammedi R.D., et al. Optimal PMU Placement in Power Grid Using Sine Cosine Algorithm. 2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS); 24–25 November 2018; Medea, Algeria; 2018. pp. 1–5.
118. Sampaio F.C., Tofoli F.L., Melo L.S., et al. Smart Protection System for Microgrids with Grid-Connected and Islanded Capabilities Based on an Adaptive Algorithm // *Energies.* 2023. Vol. 16. pp. 2273.
119. Iamandi A., Arghira N., Constantin I.C., et al. The Influence of Digital Communications in Protection Schemes. 2019 22nd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS); 28–30 May 2019; Bucharest, Romania; 2019. pp. 363–368.
120. Sheng S., Chan W.L., Li K.K., et al. Context Information-Based Cyber Security Defense of Protection System // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2007. Vol. 22. pp. 1477–1481.
121. Queiroz A.R.S., Senger E.C., de Oliveira M.F., et al. Reducing Arc Flash Incident Energy Level in an Offshore Gas Production Unit Using Intelligent Electronic Devices—A Case Study // *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2015. Vol. 51. pp. 129–133.
122. Bindi M., Corti F., Aizenberg I., et al. Machine Learning-Based Monitoring of DC-DC Converters in Photovoltaic Applications // *Algorithm.* 2022. Vol. 15. pp. 74.
123. Wang L., Zhao Q., Liang D. Fault Diagnosis of UHVDC Transmission Line Based on Deep Neural Network. 2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia); 8–11 July 2022; Shanghai, China; 2022. pp. 445–450.
124. Hayder A.N., Saidi L. Applications of Artificial Neural Networks with Input and Output Degradation Data for Renewable Energy Systems Fault Prognosis. 2021 12th International Renewable Energy Congress (IREC); 26–28 October 2021; Hammamet, Tunisia; 2021. pp. 1–6.
125. Bortoni E.C., Santos L., Bastos G.S. A Model to Extract Wind Influence from Outdoor IR Thermal Inspections // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2013. Vol. 28. pp. 1969–1970.
126. Wanderley Neto E.T., Da Costa E.G., Maia M.J.A. Influence of Emissivity and Distance in High Voltage Equipments Thermal Imaging. 2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America; 15–18 August 2006; Caracas, Venezuela; 2006. pp. 1–4.
127. Comte C., Lacasse R. Applicability of resistance and temperature measurements for the characterization of full tension compression splices. 2003 IEEE 10th International Conference on Transmission and Distribution Construction Operation and Live-Line Maintenance 2003. 2003 IEEE ESMO; 6–10 April 2003; Orlando, FL, USA; 2003. pp. 95–102.
128. de Paulis F., Olivieri C., Orlandi A., et al. Exploring Remote Monitoring of Degraded Compression and Bolted Joints in HV Power Transmission Lines // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2016. Vol. 31. pp. 2179–2187.
129. Belardi R., Bindi M., Grasso F., et al. A complex Neural Classifier for the Fault Prognosis and Diagnosis of Overhead Electrical Lines. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020 International Conference on Advanced Electrical and Energy Systems; 18–21 August 2020; Osaka Japan. IOP Publishing Ltd.: Bristol UK; 2020. Volume 582.
130. Bindi M., Aizenberg I., Belardi R., et al. Neural Network-Based Fault Diagnosis of Joints in High Voltage Electrical Lines // *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.* 2020. Vol. 5. pp. 488–498. [Google Scholar] [CrossRef]
131. Aizenberg I. Complex-Valued Neural Networks with Multi-Valued Neurons. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany; 2011.
132. Fontana G., Luchetta A., Manetti S., et al. An unconditionally sound algorithm for testability analysis in linear time invariant electrical networks // *Int. J. Circuit Theory Appl.* 2016. Vol. 44. pp. 1308–1340.

133. Aizenberg I., Bindi M., Grasso F., et al. Testability Analysis in Neural Network Based Fault Diagnosis of DC-DC Converter. 2019 IEEE 5th International Forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI); 9–12 September 2019; Florence, Italy; 2019. pp. 265–268.
134. Sturchio A., Fioriti G., Pompili M., et al. Failure rates reduction in SmartGrid MV underground distribution cables: Influence of temperature. 2014 AEIT Annual Conference—From Research to Industry: The Need for a More Effective Technology Transfer (AEIT); 18–19 September 2014; Trieste, Italy; 2014. pp. 1–6.
135. Sturchio A., Fioriti G., Salustest V., et al. Thermal behavior of distribution MV underground cables. 2015 AEIT International Annual Conference (AEIT); 14–16 October 2015; Naples, Italy; 2015. pp. 1–5.
136. Aizenberg I., Belardi R., Bindi M., et al. Failure Prevention and Malfuction Localization in Underground Medium Voltage Cables // *Energies*. 2021. Vol. 14. pp. 85.
137. Conte G. Manuale di Impianti Elettrici. HOEPLI: Milan Italy; 2009.
138. Aras F., Alekperov V., Can N., Kirkici H. Aging of 154 kV underground power cable insulation under combined thermal and electrical stresses. // *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2007. Vol. 23, N 5. pp. 25–33.
139. Bindi M., Grasso F., Luchetta A., et al. A New Application of Power Line Communication Technologies: Prognosis of Failure in Underground Cables. 2022 International Conference on Electrical Computer Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME); 16–18 November 2022; Maldives, Maldives; 2022. pp. 1–6.
140. Cataliotti A., Daidone A., Tine G. A Medium-Voltage Cables Model for Power-Line Communication // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2009. Vol. 24. pp. 129–135.
141. Meng J., Yue M., Diallo D. Nonlinear extension of battery constrained predictive charging control with transmission of Jacobian matrix // *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2023. Vol. 146. pp. 108762.
142. Lare P., Sarabi S., Delpha C., et al. Stator winding Inter-turn short-circuit and air gap eccentricity fault detection of a Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor in Electrified vehicle. 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS); 31 October–3 November 2021; Gyeongju, Republic of Korea; 2021. pp. 932–937.
143. Mousavi Gargari S., Wouters P.A.A.F., van der Wielen P.C.J.M., et al. Partial discharge parameters to evaluate the insulation condition of on-line located defects in medium voltage cable networks // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2011. Vol. 18. pp. 868–877.
144. So C.W., Li K.K., Lai K.T., et al. Application of genetic algorithm for overcurrent relay coordination. Sixth International Conference on Developments in Power System Protection (Conf. Publ. No. 434); 25–27 March 1997; Nottingham, UK; 1997. pp. 66–69.
145. Bedekar P.P., Bhide S.R. Optimum Coordination of Directional Overcurrent Relays Using the Hybrid GA-NLP Approach // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2011. Vol. 26. pp. 109–119.
146. Amraee T. Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Seeker Algorithm // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2012. Vol. 27. pp. 1415–1422.
147. Moirangthem J., Krishnanand K.R., Dash S.S., et al. Adaptive differential evolution algorithm for solving non-linear coordination problem of directional overcurrent relays // *IET Gener. Transm. Distrib.* 2013. Vol. 7. pp. 329–336.
148. Lee C.-H., Chen C.-R. Using Genetic Algorithm for Overcurrent Relay Coordination in Industrial Power System. 2007 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems; 5–8 November 2007; Kaohsiung, Taiwan; 2007. pp. 1–5.
149. Purwar E., Vishwakarma D.N., Singh S.P. A Novel Constraints Reduction-Based Optimal Relay Coordination Method Considering Variable Operational Status of Distribution System with DGs // *IEEE Trans. Smart Grid.* 2019. Vol. 10. pp. 889–898.
150. Yang H.T., Chang W.Y., Huang C.L. A new neural networks approach to on-line fault section estimation using information of protective relays and circuit breakers // *IEEE Trans. Power Deliv.* 1994. Vol. 9. pp. 220–230.
151. Osman A.H., Abdelazim T., Malik O.P. Transmission line distance relaying using on-line trained neural networks // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2005. Vol. 20. pp. 1257–1264.
152. Cardoso G., Rolim J.G., Zurn H.H. Application of neural-network modules to electric power system fault section estimation // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2004. Vol. 19. pp. 1034–1041.
153. Kiaei I., Lotfifard S. Fault Section Identification in Smart Distribution Systems Using Multi-Source Data Based on Fuzzy Petri Nets // *IEEE Trans. Smart Grid.* 2020. Vol. 11. pp. 74–83.
154. Jamali S., Bahmanyar A., Borhani-Bahabadi H. A fast and accurate fault location method for distribution networks with dg using genetic algorithms. 2015 Smart Grid Conference (SGC); 22–23 December 2015; Tehran, Iran; 2015. pp. 110–114.
155. Bedekar P.P., Bhide S.R., Kale V.S. Fault section estimation in power system using neuro-genetic approach. 2009 International Conference on Power Systems; 27–29 December 2009; Kharagpur, India; 2009. pp. 1–6.

156. Ahmed A.S., Attia M.A., Hamed N.M., et al. Comparison between genetic algorithm and whale optimization algorithm in fault location estimation in power systems. 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON); 19–21 December 2017; Cairo, Egypt; 2017. pp. 631–637.
157. Sanaye-Pasand M., Malik O.P., Chen Z., et al. Discussion of “Artificial neural network approach to single-ended fault locator for transmission lines” // IEEE Trans. Power Syst. 2001. Vol. 16. 949–950.
158. Lan S., Chen M.-J., Chen D.-Y. A Novel HVDC Double-Terminal Non-Synchronous Fault Location Method Based on Convolutional Neural Network // IEEE Trans. Power Deliv. 2019. Vol. 34. pp. 848–857.
159. Osman A.H., Abdelazim T., Malik O.P. Genetic algorithm approach for adaptive data window distance relaying. 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491); 13–17 July 2003; Toronto, ON, Canada; 2003. Vol. 3. pp. 1862–1867.
160. Gupta M., Srivastava S., Gupta J.R.P. Power System Frequency Estimation Using Neural Network and Genetic Algorithm. 2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference ;12–15 October 2008; New Delhi, India; 2008. pp. 1–5.
161. Abdelaziz A.Y., Aleem S.H.E.A., Yadav A. Artificial Intelligence Applications in Electrical Transmission and Distribution Systems Protection. 1st ed. CRC Press: Boca Raton, FL, USA; 2022.

Авторы публикации

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

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

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

References

1. Dewangan F, Abdelaziz AY, Biswal M. Load Forecasting Models in Smart Grid Using Smart Meter Information: A Review. *Energies*. 2023;16:1404. doi: <https://doi.org/10.3390/en16031404>.
2. Al-Saadi M, Al-Greer M, Short M. Reinforcement Learning-Based Intelligent Control Strategies for Optimal Power Management in Advanced Power Distribution Systems: A Survey. *Energies*. 2023;16:1608.
3. Hussain S, El-Bayeh CZ, Lai C, Eicker U. Multi-Level Energy Management Systems Toward a Smarter Grid: A Review. *IEEE Access*. 2021;9:71994–13.
4. Rind YM, Raza MH, Zubair M, et al. Smart Energy Meters for Smart Grids an Internet of Things Perspective. *Energies*. 2023;16:1974.
5. Simion C-P, Verdeş C-A, Mironescu A-A, et al. Digitalization in Energy Production Distribution and Consumption: A Systematic Literature Review. *Energies*. 2023;16:1960.
6. Mahela OP, Khosravy M, Gupta N, et al. Comprehensive overview of multi-agent systems for controlling smart grids. *CSEE J. Power Energy Syst*. 2022;8:115–17.
7. Fabrício MA, Behrens FH, Bianchini D. Monitoring of Industrial Electrical Equipment Using IoT. *IEEE Lat. Am. Trans*. 2020;18:1425–8.
8. Wang S, Zhou L, Wang T, et al. Fast protection strategy for DC transmission lines of MMC-based MT-HVDC grid. *Chin. J. Electr. Eng*. 2021;7:83–10.
9. Jiang J-A, Chiu H-C, Yang Y-C, et al. On Real-Time Detection of Line Sags in Overhead Power Grids Using an IoT-Based Monitoring System: Theoretical Basis, System Implementation, and Long-Term Field Verification. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022;9(15):389–7. doi: 10.1109/JIOT.2021.3139933
10. Klyushkin NG, Lachugin VF. A Statistical Overview of Fault Location Methods and Problems in Calculating and Locating Faults in 110 kV (and Higher) Power Transmission Lines. *Power Technol. Eng*. 2020;54:250–5.
11. Chen B. Fault Statistics and Analysis of 220-kV and above Transmission Lines in a Southern Coastal Provincial Power Grid of China. *IEEE Open Access J. Power Energy*. 2020;7:122–8.
12. Ebtsam AH, Bishoy ES, Ebrahim AB. Impact and assessment of the overvoltage mitigation methods in low-voltage distribution networks with excessive penetration of PV systems: A review. *Electrical Energy Systems*. 2021;31(12):1–32. doi: 10.1002/2050-7038.13161

13. Probst FL, Beltle M, Tenbohlen S. Measurement of Transient Overvoltages by Capacitive Electric Field Sensors. *Sensors*. 2024;24(5):1357-20. <https://doi.org/10.3390/s24051357>
14. Reddy SA, Kumari MS. A review of switching overvoltage modeling in UHV AC transmission lines. *Electric Power Systems Research*. 2024;236:110902. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110902>
15. He Q, Ding L, Kong Z-M, et al. Distributed Scheme for Line Overload Mitigation with Linearized AC Power Flow. *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*. 2022;69:2877–5.
16. Zhang X, Wang X, Li Z, et al. Optimization of Impedance-Accelerated Inverse-Time Over-Current Protection Based on Improved Quantum Genetic Algorithm. *Energies*. 2023;16:1119.
17. Ding Z, Yu K, Wang C, et al. Transmission Line Overload Risk Assessment Considering Dynamic Line Rating Mechanism in a High-Wind-Penetrated Power System: A Data-Driven Approach. *IEEE Trans. Sustain. Energy*. 2022;13:1112–11.
18. Al Talaq M, Al-Muhaini M. Optimal Coordination of Time Delay Overcurrent Relays for Power Systems with Integrated Renewable Energy Sources. *Energies*. 2022;15:6749.
19. Foqha T, Khammash M, Alsadi S, et al. Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Hybrid Firefly–Genetic Algorithm. *Energies*. 2023; 16(14):5328. <https://doi.org/10.3390/en16145328>
20. Hong L, Rizwan M, Wasif M, et al. User-Defined Dual Setting Directional Overcurrent Relays with Hybrid Time Current-Voltage Characteristics-Based Protection Coordination for Active Distribution Network. *IEEE Access*. 2021;9:62752-18. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3074426
21. Li B, Li C, Guo F, et al. Overcurrent Protection Coordination in a Power Distribution Network with the Active Superconductive Fault Current Limiter. *IEEE Trans. Appl. Supercond*. 2014;24:1–4.
22. Rajesh P, Kannan R, Vishnupriyan J, et al. Optimally detecting and classifying the transmission line fault in power system using hybrid technique. *ISA Transactions*. 2022;130:253-12. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2022.03.017>
23. Kordestani M, Saif M, Orchard M.E, et al. Failure Prognosis and Applications—A Survey Recent Literature. *IEEE Trans. Reliab*. 2021;70:728–21.
24. Nazir MI, Hussain I, Ahmad A, et al. System Modeling and Reliability Assessment of Microgrids: A Review. *Sustainability*. 2022; 14(1):126. <https://doi.org/10.3390/su14010126>
25. Escobar JJM, Matamoros OM, Padilla RT, et al. A Comprehensive Review on Smart Grids: Challenges and Opportunities. *Sensors*. 2021; 21(21):6978. <https://doi.org/10.3390/s21216978>
26. Nabatirad M, Razzaghi R, Bahrani B. Autonomous power balance in hybrid AC/DC microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2023;146:108752. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108752>
27. Gallegos J, Arévalo P, Montaleza C, et al. Sustainable Electrification—Advances and Challenges in Electrical-Distribution Networks: A Review. *Sustainability*. 2024; 16(2):698. <https://doi.org/10.3390/su16020698>
28. Jamil F, Iqbal N, Imran, et al. Peer-to-Peer Energy Trading Mechanism Based on Blockchain and Machine Learning for Sustainable Electrical Power Supply in Smart Grid. *IEEE Access*. 2021;9:39193-25. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3060457
29. Wang Y, Zhang D, Li Y, et al. Enhancing Power Grid Resilience With Blockchain-Enabled Vehicle-to-Vehicle Energy Trading in Renewable Energy Integration. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2024;60(2):2037–16. DOI: 10.1109/TIA.2023.3312639
30. Shams MH, Niaz H, Hashemi B, et al. Artificial intelligence-based prediction and analysis of the oversupply of wind and solar energy in power systems. *Energy Conversion and Management*. 2021;250:114892. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114892>
31. Qiu M. Study on Isolated Island Detection Technology of Distributed PV Grid System. 2023 *Asia-Europe Conference on Electronics, Data Processing and Informatics (ACEDPI)*; 17-19 April 2023; Prague, Czech Republic. IEEE; 2023. pp. 539-544. DOI: 10.1109/ACEDPI58926.2023.00107
32. Mishra A, Jena P. A Scheduled Intentional Islanding Method Based on Ranking of Possible Islanding Zone. *IEEE Trans. Smart Grid*. 2021;12:1853–14. doi:10.1109/tsg.2020.3039384
33. Succetti F, Rosato A, Araneo R, et al. Challenges and Perspectives of Smart Grid Systems in Islands: A Real Case Study. *Energies*. 2023; 16(2):583. <https://doi.org/10.3390/en16020583>
34. Li X, Wang L, Yan N, et al. Cooperative Dispatch of Distributed Energy Storage in Distribution Network with PV Generation Systems. *IEEE Trans. Appl. Supercond*. 2021;31:1–4.
35. Ding T, Wang Z, Qu M, et al. A Sequential Black-Start Restoration Model for Resilient Active Distribution Networks. *IEEE Trans. Power Syst*. 2022;37:3133–4.
36. Zhao J, Zhang Q, LIU Z, et al. A Distributed Black-Start Optimization Method for Global Transmission and Distribution Network. *IEEE Trans. Power Syst*. 2021;36:4471–11.
37. Furse CM, Kafal M, Razzaghi R, et al. Fault Diagnosis for Electrical Systems and Power Networks: A Review. *IEEE Sens. J*. 2021;21:888–9.

38. Han C, Gao K, Changet W, et al. Research on the Evolution Mechanism of Partial Discharge Signals for Arcing Faults in Transformers. *IEEE Access*. 2025;13:8023-9. doi: 10.1109/ACCESS.2025.3525953
39. Jakaria AHM, Rahman MA, Gokhale A. Resiliency-Aware Deployment of SDN in Smart Grid SCADA: A Formal Synthesis Model. *IEEE Trans. Netw. Serv. Manag.* 2021;18:1430–15.
40. Majeed AA, Altaie AS, Abderrahim M, et al. A Review of Protection Schemes for Electrical Distribution Networks with Green Distributed Generation. *Energies*. 2023; 16(22):7587. <https://doi.org/10.3390/en16227587>
41. Bui DM, Le PD, Nguyen TP, et al. An Adaptive and Scalable Protection Coordination System of Overcurrent Relays in Distributed-Generator-Integrated Distribution Networks. *Applied Sciences*. 2021; 11(18):8454. <https://doi.org/10.3390/app11188454>
42. Martínez-Figueroa GdJ, Córcoles-López F, Bogarra S. FPGA-Based Smart Sensor to Detect Current Transformer Saturation during Inrush Current Measurement. *Sensors*. 2023; 23(2):744. <https://doi.org/10.3390/s23020744>
43. Peng F, Gao H, Huang J, et al. Power Differential Protection for Transformer Based on Fault Component Network. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2023;38:2464–14.
44. Darwish HA, Taalab MI, Ahmed ES. Investigation of power differential concept for line protection. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2005;20:617–8.
45. Liu S, Wang B, Zhao Y, et al. Novel Differential Protection Approach of UHV AC Transmission Lines Based on Tellegen's Quasi-Power Theorem. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2022;37:1264–11.
46. Vazquez E, Castruita J, Chacon O.L, et al. A New Approach Traveling-Wave Distance Protection—Part I: Algorithm. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2007;22:795–6.
47. Sinclair A, Finney D, Martin D, et al. Distance Protection in Distribution Systems: How It Assists with Integrating Distributed Resources. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2014;50:2186–11.
48. Prenc R, Rojnić M, Franković D, et al. On the Development of Overcurrent Relay Optimization Problem for Active Distribution Networks. *Energies*. 2022;15:6528.
49. Węgiełek P, Kostyla D, Lech M. Directions of Development of Diagnostic Methods of Vacuum Medium-Voltage Switchgear. *Energies*. 2023; 16(5):2087. <https://doi.org/10.3390/en16052087>
50. Torres BS, Borges da Silva LE, Salomon CP, et al. Integrating Smart Grid Devices into the Traditional Protection of Distribution Networks. *Energies*. 2022; 15(7):2518. <https://doi.org/10.3390/en15072518>
51. Bindi M, Piccirilli MC, Luchetta A, et al. A Comprehensive Review of Fault Diagnosis and Prognosis Techniques in High Voltage and Medium Voltage Electrical Power Lines. *Energies*. 2023; 16(21):7317. <https://doi.org/10.3390/en16217317>
52. Guillén-López D, Serrano-Guerrero X, Barragán-Escandón A, et al. Transient and Steady-State Evaluation of Distributed Generation in Medium-Voltage Distribution Networks. *Energies*. 2024; 17(22):5783. <https://doi.org/10.3390/en17225783>
53. Li Z, Zhang Y, Wu H, Suzuki S, et al. Design and Application of a UAV Autonomous Inspection System for High-Voltage Power Transmission Lines. *Remote Sensing*. 2023; 15(3):865. <https://doi.org/10.3390/rs15030865>
54. Bindi M, Piccirilli MC, Luchetta A, et al. A Comprehensive Review of Fault Diagnosis and Prognosis Techniques in High Voltage and Medium Voltage Electrical Power Lines. *Energies*. 2023; 16(21):7317. <https://doi.org/10.3390/en16217317>
55. Liao C, Yi Y, Chen T, et al. Detecting Broken Strands in Transmission Lines Based on Pulsed Eddy Current. *Metals*. 2022; 12(6):1014. <https://doi.org/10.3390/met12061014>
56. Rondineau A, Gaillet L, Dieng L, et al. Degradation of Steel Wires in Bimetallic Aluminum–Steel Conductors Exposed to Severe Corrosion Conditions. *Corrosion and Materials Degradation*. 2022; 3(4):646–660. <https://doi.org/10.3390/cmd3040035>
57. Jurkiewicz B, Smyrak B. Studies on the Evolution of Fatigue Strength of Aluminium Wires for Overhead Line Conductors. *Materials*. 2024; 17(11):2537. <https://doi.org/10.3390/ma17112537>
58. Gao J, Wang L, Wu S, et al. Prediction of Breakdown Voltage of Equipotential Live-Line Work Air Gaps in Transmission Lines: A Computational Discharge Model. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2022;64(6):1932-9. doi: 10.1109/TEM.2022.3193203
59. Govindarajan S, Morales A, Ardila-Rey JA, et al. A review on partial discharge diagnosis in cables: Theory, techniques, and trends. *Measurement*. 2023;216:112882. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112882>
60. Zhang X, Pang B, Liu Y, et al. Review on Detection and Analysis of Partial Discharge along Power Cables. *Energies*. 2021;14:7692.
61. Song Y, Chen W, Wan F, et al. Online multi-parameter sensing and condition assessment technology for power cables: A review. *Electric Power Systems Research*. 2022;210:108140. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108140>

62. Szczegielniak T, Kusiak D, Jabłoński P. Thermal Analysis of the Medium Voltage Cable. *Energies*. 2021;14:4164.
63. Balakrishnan GK, Yaw CT, Koh SP, Abedin T, Raj AA, Tiong SK, Chen CP. A Review of Infrared Thermography for Condition-Based Monitoring in Electrical Energy: Applications and Recommendations. *Energies*. 2022; 15(16):6000. <https://doi.org/10.3390/en15166000>
64. Shams F, Omar M, Usman M, et al. Thermal Imaging of Utility Power Lines: A Review. 2022 *International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*; 27–28 October 2022; Kuala Lumpur, Malaysia; 2022. pp. 1–4.
65. Mo S, Zhang D, Li Z, et al. The Possibility of Fault Location in Cross-Bonded Cables by Broadband Impedance Spectroscopy. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2021;28:1416–8.
66. Ciaburro G, Iannace G. Machine-Learning-Based Methods for Acoustic Emission Testing: A Review. *Applied Sciences*. 2022; 12(20):10476. <https://doi.org/10.3390/app122010476>
67. Witos F, Olszewska A, Opilski Z, et al. Application of Acoustic Emission and Thermal Imaging to Test Oil Power Transformers. *Energies*. 2020;13:5955.
68. Werelius P, Tharning P, Eriksson R, et al. Dielectric spectroscopy for diagnosis of water tree deterioration in XLPE cables. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2001;8:27–16.
69. Nadolny Z. Electric Field Distribution and Dielectric Losses in XLPE Insulation and Semiconductor Screens of High-Voltage Cables. *Energies*. 2022; 15(13):4692. <https://doi.org/10.3390/en15134692>
70. Sikorski W, Walczak K, Gil W, et al. On-Line Partial Discharge Monitoring System for Power Transformers Based on the Simultaneous Detection of High Frequency Ultra-High Frequency and Acoustic Emission Signals. *Energies*. 2020;13:3271.
71. Rybarz J, Borucki S, Kunicki M, et al. Influence of the Cable Accessories Installing Method on the Partial Discharge Activity in Medium Voltage Cables. *Energies*. 2022;15:4216.
72. Rosle N, Muhamad NA, Rohani MNKH, et al. Partial Discharges Classification Methods in XLPE Cable: A Review. *IEEE Access*. 2021;9:133258-16. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3115519
73. Li Y, Jiang L, Xie M, Yu J, Qian L, Xu K, Chen M, Wang Y. Advancements and Challenges in Power Cable Laying. *Energies*. 2024; 17(12):2905. <https://doi.org/10.3390/en17122905>
74. Maraaba L., Al-Soufi, K., Ssennoga T., et al. Contamination Level Monitoring Techniques for High-Voltage Insulators: A Review // *Energies*. 2022. Vol. 15. 7656.
75. Ivanov DA. Features of monitoring extra large partial discharge in high voltage insulators. Power engineering: research, equipment, technology. 2022;24(1):151-163. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-1-151-163>.
76. Hoduń P, Borecki M. Reliability Assessment of MV Power Connections. *Energies*. 2021;14. 6965.
77. Barbieri L, Villa A, Malgesini R, et al. An Innovative Sensor for Cable Joint Monitoring and Partial Discharge Localization. *Energies*. 2021; 14(14):4095. <https://doi.org/10.3390/en14144095>
78. Albarracin R, Rodriguez-Serna JM, Masud AA. Finite-element-analysis models for numerical simulation of partial discharges in spherical cavities within solid dielectrics: A review and a novel method. *High Volt*. 2020;5:556–13.
79. Rahman MA, Saha A, Ghassemi M. Optimized Fabrication Process and PD Characteristics of MVDC Multilayer Insulation Cable Systems for Next Generation Wide-Body All-Electric Aircraft. *Energies*. 2024; 17(12):3040. <https://doi.org/10.3390/en17123040>
80. Choudhary M, Shafiq M, Kiitam I, et al. Investigation of partial discharge characteristics in XLPE cable insulation under increasing electrical stress. *Engineering Failure Analysis*. 2024;158:108006. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108006>
81. Mcallister IW. Electric field theory and the fallacy of void capacitance. *IEEE Trans. Electr. Insul.* 1991;26:458–2.
82. Crichton GC, Karlsson PW, Pedersen A. Partial discharges in ellipsoidal and spheroidal voids. *IEEE Trans. Electr. Insul.* 1989;24:335–8.
83. Mami MS, Köksal M. Remark on the lumped parameter modeling of transmission lines. *Electr. Mach. Power Syst*. 2000;28:565–11.
84. Suyaroj N, Premrudeepreechacharn S, Watson N.R. Transient state estimation with the Bergeron transmission line model. *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* 2017;25:806–14.
85. Abdullah H, Uwe S. A full frequency-dependent cable model for the calculation of fast transients. *Energies*. 2017;10:1158.
86. Wagenaars P, Wouters P, van der Wielen P.C.J.M, et al. Measurement of transmission line parameters of three-core power cables with common earth screen. *IET Sci. Meas. Technol.* 2010;4:146–10.
87. Du Z, Willett PK, Mashikian M.S. Performance limits of PD location based on time-domain reflectometry. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 1997;4. 182–7.

88. Robles G, Shafiq M, Martínez-Tarifa JM. Multiple Partial Discharge Source Localization in Power Cables through Power Spectral Separation and Time-Domain Reflectometry. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2019;68:4703–9.
89. Snell J, Renowden J. Improving results of thermographic inspections of electrical transmission and distribution lines. *2000 IEEE ESMO—2000 IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction Operation and Live-Line Maintenance Proceedings. ESMO 2000 Proceedings. Global ESMO 2000; 8–12 October 2000; The Pow, Montreal, QC, Canada. 2000 IEEE: Piscataway, NJ, USA; 2000. pp. 135–144.*
90. Ohki Y, Yamada T, Hirai N. Diagnosis of cable aging by broadband impedance spectroscopy. *2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena; 16–19 October 2011; Cancun, Mexico; 2011. pp. 24–27.*
91. Zhou Z, Zhang D, He J, et al. Local degradation diagnosis for cable insulation based on broadband impedance spectroscopy. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2015;22:2097–11.
92. Avellan A, Werelius P, Eriksson R. Frequency domain response of medium voltage XLPE cable terminations and its influence on cable diagnostics. *Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.00CH37075); 5 April 2000; Anaheim, CA, USA; 2000. pp. 105–108.*
93. Yong H, Minyou C, Jinqian Z. High impedance fault identification method of the distribution network based on discrete wavelet transformation. *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering; 16–18 September 2011; Yichang, China; 2011. pp. 2262–2265.*
94. Li W, Liu Y, Li Y, et al. Series Arc Fault Diagnosis and Line Selection Method Based on Recurrent Neural Network. *IEEE Access.* 2020;8:177815–8.
95. Ding S, Zhang P, Ding E, et al. On the application of PCA technique to fault diagnosis. *Tsinghua Sci. Technol.* 2010;15:138–7.
96. Chen H, Jiang B, Lu N, et al. Deep PCA Based Real-Time Incipient Fault Detection and Diagnosis Methodology for Electrical Drive in High-Speed Trains. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2018;67:4819–12.
97. Zhao H, Zheng J, Xu J, et al. Fault Diagnosis Method Based on Principal Component Analysis and Broad Learning System. *IEEE Access.* 2019;7:99263–10. doi:10.1109/access.2019.2929094
98. Zolfaghari M, Chabanlo R.M, Abedi M, et al. A Robust Distance Protection Approach for Bulk AC Power System Considering the Effects of HVDC Interfaced Offshore Wind Units. *IEEE Syst. J.* 2018;12:3786–10.
99. Nengling T, Chen C. A New Weak Fault Component Reactance Distance Relay Based on Voltage Amplitude Comparison. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2008;23:87–7.
100. Liang Y, Li W, Lu Z, et al. A New Distance Protection Scheme Based on Improved Virtual Measured Voltage. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2020;35:774–13. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2926295>
101. Hu Y, Novosel D, Saha MM, et al. An adaptive scheme for parallel-line distance protection. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2022;17:105–6.
102. Wang Y, Wang Y, Ma N, et al. Waveform-Similarity-Based Protection Scheme for AC Transmission Lines of MMC-HVDC System with Offshore Wind Farms. *Energies.* 2022;15:9107.
103. Wang Q, Ma J, Shang L, et al. Analysis of the Effects of Grid-Connected Charging/Discharging Stations on Relay Protection. *Energies.* 2022;15:9065.
104. Bakkar M, Bogarra S, Córcoles F, et al. Artificial Intelligence-Based Protection for Smart Grids. *Energies.* 2022;15:4933.
105. Milosevic B, Begovic M. Nondominated sorting genetic algorithm for optimal phasor measurement placement. *2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491); 13–17 July 2003; Toronto, ON, Canada; 2003. pp. 69–75.*
106. Xu J, Wen MHF, Li VOK, et al. Optimal PMU placement for wide-area monitoring using chemical reaction optimization. *2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT); 24–27 February 2013; Washington, DC, USA; 2013. pp. 1–6.*
107. Reddy KSK, Rao DAK, Kumarraja A, et al. Implementation of Integer Linear Programming and Exhaustive Search algorithms for optimal PMU placement under various conditions. *2015 IEEE Power Communication and Information Technology Conference (PCITC); 15–17 October 2015; Bhubaneswar, India; 2015. pp. 850–855.*
108. Huang L, Sun Y, Xu J, et al. Optimal PMU Placement Considering Controlled Islanding of Power System. *IEEE Trans. Power Syst.* 2014;29:742–14.
109. Chatterjee S, Saha Roy BK, Ghosh PK. Optimal Placement of PMU Considering Practical Costs in Wide Area Network. *2017 14th IEEE India Council International Conference (INDICON); 15–17 December 2017; Roorkee, India; 2017. pp. 1–6.*

110. Manousakis NM, Korres GN. Optimal Allocation of Phasor Measurement Units Considering Various Contingencies and Measurement Redundancy. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2020;69. 3403–9.
111. Zhu X, Wen MHF, Li VOK, et al. Optimal PMU-Communication Link Placement for Smart Grid Wide-Area Measurement Systems. *IEEE Trans. Smart Grid.* 2019;10:4446–11.
112. Wojtowicz R, Kowalik R, Rasolomampionona DD. Next Generation of Power System Protection Automation—Virtualization of Protection Systems. // *IEEE Trans. Power Deliv.* 2018. Vol. 33. 2002–2010.
113. Kumar S, Abu-Siada A, Das N, et al. Reverse Blocking Over Current Busbar Protection Scheme Based on IEC 61850 Architecture. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2023;59:2225–9.
114. Ma J, Ma W, Yan X, et al. A New Adaptive Backup Protection Scheme Based on Intelligent Electronic Devices. *Can. J. Electr. Comput. Eng.* 2015;38:77–12.
115. Ma J, Ma W, Yan X, et al. A New Adaptive Voltage Protection Scheme for Distribution Network with Distributed Generations. *Can. J. Electr. Comput. Eng.* 2013;36:142–10.
116. Barra PH.A, Coury DV, Fernandes RAS. A survey on adaptive protection of microgrids and distribution systems with distributed generators. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020;118:109524.
117. Laouamer M, Kouzou A, Mohammedi RD, et al. Optimal PMU Placement in Power Grid Using Sine Cosine Algorithm. *2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS); 24–25 November 2018; Medea, Algeria;* 2018. pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICASS.2018.8651991>
118. Sampaio FC, Tofoli FL, Melo LS, et al. Smart Protection System for Microgrids with Grid-Connected and Islanded Capabilities Based on an Adaptive Algorithm. *Energies.* 2023;16:2273.
119. Iamandi A, Arghira N, Constantin IC, et al. The Influence of Digital Communications in Protection Schemes. *2019 22nd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS); 28–30 May 2019; Bucharest, Romania;* 2019. pp. 363–368.
120. Sheng S, Chan WL, Li KK, et al. Context Information-Based Cyber Security Defense of Protection System. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2007;22:1477–5.
121. Queiroz ARS, Senger EC, de Oliveira MF, et al. Reducing Arc Flash Incident Energy Level in an Offshore Gas Production Unit Using Intelligent Electronic Devices—A Case Study. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2015;51:129–5.
122. Bindi M, Corti F, Aizenberg I, et al. Machine Learning-Based Monitoring of DC-DC Converters in Photovoltaic Applications. *Algorithm.* 2022;15:74.
123. Wang L, Zhao Q, Liang D. Fault Diagnosis of UHVDC Transmission Line Based on Deep Neural Network. *2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia); 8–11 July 2022; Shanghai, China;* 2022. pp. 445–450.
124. Hayder AN, Saidi L. Applications of Artificial Neural Networks with Input and Output Degradation Data for Renewable Energy Systems Fault Prognosis. *2021 12th International Renewable Energy Congress (IREC); 26–28 October 2021; Hammamet, Tunisia;* 2021. pp. 1–6.
125. Bortoni EC, Santos L, Bastos GS. A Model to Extract Wind Influence from Outdoor IR Thermal Inspections. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2013;28:1969–2.
126. Wanderley Neto ET, Da Costa EG, Maia MJA. Influence of Emissivity and Distance in High Voltage Equipments Thermal Imaging. *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America; 15–18 August 2006; Caracas, Venezuela;* 2006. pp. 1–4.
127. Comte C, Lacasse R. Applicability of resistance and temperature measurements for the characterization of full tension compression splices. *2003 IEEE 10th International Conference on Transmission and Distribution Construction Operation and Live-Line Maintenance 2003. 2003 IEEE ESMO; 6–10 April 2003; Orlando, FL, USA;* 2003. pp. 95–102.
128. de Paulis F, Olivieri C, Orlandi A, et al. Exploring Remote Monitoring of Degraded Compression and Bolted Joints in HV Power Transmission Lines. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2016;31:2179–8.
129. Belardi R, Bindi M, Grasso F, et al. A complex Neural Classifier for the Fault Prognosis and Diagnosis of Overhead Electrical Lines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020 International Conference on Advanced Electrical and Energy Systems; 18–21 August 2020; Osaka Japan. IOP Publishing Ltd.: Bristol UK;* 2020. Vol. 582.
130. Bindi M, Aizenberg I, Belardi R, et al. Neural Network-Based Fault Diagnosis of Joints in High Voltage Electrical Lines. *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.* 2020;5:488–11. doi: 10.25046/aj050458
131. Aizenberg I. *Complex-Valued Neural Networks with Multi-Valued Neurons.* Springer: Berlin/Heidelberg, Germany; 2011.
132. Fontana G, Luchetta A, Manetti S, et al. An unconditionally sound algorithm for testability analysis in linear time invariant electrical networks. *Int. J. Circuit Theory Appl.* 2016;44:1308–33.
133. Aizenberg I, Bindi M, Grasso F, et al. Testability Analysis in Neural Network Based Fault Diagnosis of DC-DC Converter. *2019 IEEE 5th International Forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI); 9–12 September 2019; Florence, Italy;* 2019. pp. 265–268.

134. Sturchio A, Fioriti G, Pompili M, et al. Failure rates reduction in SmartGrid MV underground distribution cables: Influence of temperature. *2014 AEIT Annual Conference—From Research to Industry: The Need for a More Effective Technology Transfer (AEIT)*; 18–19 September 2014; Trieste, Italy; 2014. pp. 1–6.
135. Sturchio A, Fioriti G, Salustest V, et al. Thermal behavior of distribution MV underground cables. *2015 AEIT International Annual Conference (AEIT)*; 14–16 October 2015; Naples, Italy; 2015. pp. 1–5.
136. Aizenberg I, Belardi R, Bindi M, et al. Failure Prevention and Malfunction Localization in Underground Medium Voltage Cables. *Energies*. 2021;14:85.
137. Conte G. *Manuale di Impianti Elettrici*. HOEPLI: Milan Italy; 2009.
138. Aras F, Alekperov V, Can N, Kirkici H. Aging of 154 kV underground power cable insulation under combined thermal and electrical stresses. *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2007;23(5):25–9.
139. Bindi M, Grasso F, Luchetta A, et al. A New Application of Power Line Communication Technologies: Prognosis of Failure in Underground Cables. *2022 International Conference on Electrical Computer Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*; 16–18 November 2022; Maldives, Maldives; 2022. pp. 1–6.
140. Cataliotti A, Daidone A, Tine G. A Medium-Voltage Cables Model for Power-Line Communication. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2009;24:129–7.
141. Meng J, Yue M, Diallo D. Nonlinear extension of battery constrained predictive charging control with transmission of Jacobian matrix. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2023;146:108762.
142. Lare P, Sarabi S, Delpha C, et al. Stator winding Inter-turn short-circuit and air gap eccentricity fault detection of a Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor in Electrified vehicle. *2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*; 31 October–3 November 2021; Gyeongju, Republic of Korea; 2021. pp. 932–937.
143. Mousavi Gargari S, Wouters PAAF, van der Wielen P.C.J.M, et al. Partial discharge parameters to evaluate the insulation condition of on-line located defects in medium voltage cable networks. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2011;18:868–10.
144. So CW, Li KK, Lai KT, et al. Application of genetic algorithm for overcurrent relay coordination. *Sixth International Conference on Developments in Power System Protection (Conf. Publ. No. 434)*; 25–27 March 1997; Nottingham, UK; 1997. pp. 66–69.
145. Bedekar PP, Bhide SR. Optimum Coordination of Directional Overcurrent Relays Using the Hybrid GA-NLP Approach. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2011;26. 109–11. doi:10.1109/tpwr.2010.2080289
146. Amraee T. Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Seeker Algorithm. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2012;27:1415–8.
147. Moirangthem J, Krishnanand KR, Dash SS, et al. Adaptive differential evolution algorithm for solving non-linear coordination problem of directional overcurrent relays. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2013;7:329–8.
148. Lee C-H, Chen C-R. Using Genetic Algorithm for Overcurrent Relay Coordination in Industrial Power System. *2007 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems*; 5–8 November 2007; Kaohsiung, Taiwan; 2007. pp. 1–5.
149. Purwar E, Vishwakarma DN, Singh SP. A Novel Constraints Reduction-Based Optimal Relay Coordination Method Considering Variable Operational Status of Distribution System with DGs. *IEEE Trans. Smart Grid.* 2019;10:889–10.
150. Yang HT, Chang WY, Huang CL. A new neural networks approach to on-line fault section estimation using information of protective relays and circuit breakers. *IEEE Trans. Power Deliv.* 1994;9:220–11.
151. Osman AH, Abdelazim T, Malik OP. Transmission line distance relaying using on-line trained neural networks. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2005;20:1257–8.
152. Cardoso G, Rolim JG, Zurn HH. Application of neural-network modules to electric power system fault section estimation. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2004;19:1034–8.
153. Kiaei I, Lotfifard S. Fault Section Identification in Smart Distribution Systems Using Multi-Source Data Based on Fuzzy Petri Nets. *IEEE Trans. Smart Grid.* 2020;11:74–9.
154. Jamali S, Bahmanyar A, Borhani-Bahabadi H. A fast and accurate fault location method for distribution networks with dg using genetic algorithms. *2015 Smart Grid Conference (SGC)*; 22–23 December 2015; Tehran, Iran; 2015. pp. 110–114.
155. Bedekar PP, Bhide SR, Kale VS. Fault section estimation in power system using neuro-genetic approach. *2009 International Conference on Power Systems*; 27–29 December 2009; Kharagpur, India; 2009. pp. 1–6.
156. Ahmed AS, Attia MA, Hamed NM, et al. Comparison between genetic algorithm and whale optimization algorithm in fault location estimation in power systems. *2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*; 19–21 December 2017; Cairo, Egypt; 2017. pp. 631–637.

157. Sanaye-Pasand M, Malik OP, Chen Z, et al. Discussion of “Artificial neural network approach to single-ended fault locator for transmission lines”. *IEEE Trans. Power Syst.* 2001;16. 949–2.
158. Lan S, Chen M-J, Chen D-Y. A Novel HVDC Double-Terminal Non-Synchronous Fault Location Method Based on Convolutional Neural Network. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2019;34:848–10.
159. Osman AH, Abdelazim T, Malik OP. Genetic algorithm approach for adaptive data window distance relaying. *2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491); 13–17 July 2003; Toronto, ON, Canada; 2003. Vol. 3. pp. 1862–1867.*
160. Gupta M, Srivastava S, Gupta JRP. Power System Frequency Estimation Using Neural Network and Genetic Algorithm. *2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference ;12–15 October 2008; New Delhi, India; 2008. pp. 1–5.*
161. Abdelaziz AY, Aleem SHEA, Yadav A. *Artificial Intelligence Applications in Electrical Transmission and Distribution Systems Protection*. 1st ed. CRC Press: Boca Raton, FL, USA; 2022.

Authors of the publication

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

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

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

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **16.05.2025 г.**

Отредактировано **20.06.2025 г.**

Принято **03.07.2025 г.**



РАЗРАБОТКА БЛОКА КОРРЕКЦИИ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗА МОСТОВОГО КРАНА

Синюков А.В.¹, Синюкова Т.В.¹, Грачева Е.И.², Сафронов А.А.³

¹Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

³Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,
г. Санкт-Петербург, Россия
zeitsn@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Снижение упругих колебаний в ферме моста за счет введение в систему управления приводами перемещения моста блока синхронизации движения опор моста, на базе нечеткой логики, в функции которого также входит устранение перекоса моста возникающего вследствие перемещения тележки вдоль моста груза на гибком подвесе. МЕТОДЫ. Поставленные в исследовании задачи достигнуты за счет использования математического моделирования в среде Matlab Simulink и практических исследований. РЕЗУЛЬТАТЫ. Использование блоков коррекции, в том числе и на базе нечеткой логики привело к устранению перекоса моста, сведению его практически до нулевого значения, уменьшению амплитуды упругих колебаний в ферме моста до 45 процентов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование систем управления с блоками коррекции, в том числе и на базе нечеткой логики позволяет устранить рассинхронизацию скоростей перемещения опор моста мостового крана, что снижает нагрузку на металлоконструкцию крана, уменьшает истирание реборд колес и крановых путей, повышает надежность крана.

Ключевые слова: нечеткая логика; блок коррекции; перекос моста; имитационное моделирование; асинхронный двигатель; Matlab Simulink.

Для цитирования: Синюков А.В., Синюкова Т.В., Грачева Е.И., Сафронов А.А. Разработка блока коррекции на базе нечеткой логики для системы управления механизмом перемещения груза мостового крана // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 30-41. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-30-41.

DEVELOPMENT OF A CORRECTION UNIT BASED ON FUZZY LOGIC FOR THE CONTROL SYSTEM OF THE LOAD MOVEMENT MECHANISM OF AN OVERHEAD CRANE

Sinyukov A.V.¹, Sinyukova T.V.¹, Gracheva E.I.², Safronov A.A.³

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

³Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences
Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Saint-Petersburg,
Russia
zeitsn@yandex.ru

Abstract: THE PURPOSE. Introduction into the bridge movement drive control system of a bridge support movement synchronization unit, developed in stages on the basis of fuzzy logic to eliminate bridge tilt arising as a result of the movement of a flexible suspension load along the bridge by a trolley. METHODS. The objectives set in the study were achieved through the use of mathematical modeling in the Matlab Simulink environment and practical research. RESULTS. The use of correction units, including those based on fuzzy logic, led to the elimination of the bridge tilt, reducing it to almost zero, and reducing the amplitude of elastic vibrations in the bridge truss to 45 percent. CONCLUSION. The use of control systems with correction units,

including those based on fuzzy logic, allows eliminating the desynchronization of the speeds of movement of the bridge supports of the bridge crane, which reduces the load on the metal structure of the crane, reduces the wear of the wheel flanges and crane tracks, and increases the reliability of the crane.

Keywords: *fuzzy logic; correction unit; bridge skew; simulation; asynchronous motor; Matlab Simulink.*

For citation: Sinyukov A.V., Sinyukova T.V., Gracheva E.I., Safronov A.A. Development of a correction unit based on fuzzy logic for the control system of the load movement mechanism of an overhead crane. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (4): 30-41. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-30-41.

Введение (Introduction)

Механизмы, выполняющие перемещение груза с помощью гибкой сцепки, испытывают воздействие от раскачивающегося груза в виде формирования нагрузки на металлическую конструкцию объекта, осуществляющего транспортировку груза. При перемещении моста мостового крана возможно появление такого явления, как неравномерное движение опор моста, которое возникает из-за отклонения тележки с гибко подвешенным грузом от центрального положения при перемещении груза в точку назначения. Данное явление приводит к формированию повышенной нагрузки на одну из сторон моста, вызывая истончение подкранового пути и реборд колес, также данный процесс приводит к возникновению упругих колебаний в ферме моста.

В работе [1] для борьбы с рассматриваемым явлением предлагается внедрение в систему управления механизмом перемещения блоков, производящих сравнение значений абсолютных перемещений опор крана, полученных с помощью энкодера, установленного на прижимном ролике на каждой опоре. Полученные данные поступают в систему управления объектом, при выявлении рассогласования происходит формирование корректирующего сигнала до тех пор, пока движение опор не станет равномерным.

В исследовании [2] в систему управления предложено введение задатчиков интенсивности и датчиков, формирующих величину схода колес моста мостового крана относительно рельсов по двум осям. Формирование сигнала на датчиках говорит о наличии перекоса, что вызывает возникновение сигнала коррекции. Также в рассматриваемой системе учитывается положение тележки относительно центра моста в каждый текущий момент времени, что позволяет более точно осуществлять управляющее воздействие на показатели скорости перемещения опор.

В связи с тем, что передаточные механизмы передней и задней опор не идентичны, характеристики приводов указанных опор также будут отличаться, соответственно, данные обстоятельства также приводят к формированию перекосных явлений, избавиться от которых в материале [3] предлагается с помощью замены двух двигателей на один, который посредством кинематических цепей будет иметь связи с опорами. Также в систему управления предлагается введение датчиков, фиксирующих появление перекоса и двигателя, в функции которого входит корректировка положения моста.

Если в систему управления завести сигналы с индуктивных датчиков приближения, установленных у места сцепления опоры с колесом, фиксирующих расстояние до рельса, то по суммарным данным с датчиков с каждой из опор можно осуществить корректирующие воздействие на скорость движения опор, выравнивая их движение [4].

В работе [5] рассматривается структурная схема, содержащая совокупность устройств, в том числе и микропроцессорный блок, что позволяет привести к устранению возникновения не только перекоса, но и поперечного схода крана с рельсов. Данные с установленных на объекте бесконтактных датчиков по отклонению каждого из колес относительно центра и по направлению перемещения объекта поступают в микропроцессорный блок, откуда в качестве сигнала корректировки воздействуют на частоту вращения приводов правой и левой опор. При данном способе управления используется скалярная система управления, на ряде промышленных устройств получили широкое применение векторная система управления и прямое управление моментом [6-8]. Недостатком данной методики является громоздкий математический аппарат.

Для корректировки показателей поперечного смещения движения моста в работе [9]. В предлагаемой конструкции присутствуют датчики измерения частоты вращения электродвигателей, сигналы с которых заведены на частотный преобразователь, их

значения оказывают корректирующее воздействие на скорость движения обеих опор моста.

В работе [10] в качестве датчиков, фиксирующих появление отклонения от центрального положения колес моста, используются индуктивные датчики, установленные на передних и задних опорах моста, при появлении разницы в показаниях с датчиков, происходит подача в систему управления корректирующего сигнала с некоторым коэффициентом, его значение прямо пропорционально величине появившегося перекаса.

Для современного этапа развития промышленного производства характерным является комплексная автоматизация, проводимая с использованием интеллектуальных систем электропривода. Крановые механизмы, хотя и являются вспомогательным оборудованием, обеспечивающим работу основного технологического оборудования, в ряде случаев встроены в технологический процесс, и их безаварийная качественная работа является непременным условием выполнением всего технологического цикла.

Для обеспечения высокоточной и ответственной работы требуется, помимо высокой квалификации машиниста крана, обеспечение системами электроприводов всех крановых механизмов, выполнение скоростных режимов и демпфирование раскачивания груза до минимального уровня, а также минимизация колебаний фермы моста, связанных с его возможным перекасом, что требует совершенствования существующих систем электропривода.

Рассматриваемый объект, как и большинство технологических механизмов, является многомассовой системой [11].

Методам оптимизации систем управления посвящено значительное количество работ [12, 13].

Использование блоков коррекции на базе нечеткой логики и нейросетевых технологий в настоящее время является оптимальным методом обеспечения надлежащего управления объектом [14, 15].

Материалы и методы (Materials and methods)

Механические процессы

На мостовых кранах присутствие в устройстве перемещающихся механизмов, осуществляющих транспортировку на гибком подвесе груза, формирует создание дополнительной нагрузки на металлоконструкцию моста. На данном объекте таким механизмом является тележка мостового крана, осуществляющая перемещение груза вдоль пролета моста. Оказавшись под действием описанной нагрузки, опоры моста становятся неравномерно нагруженными из-за смещения тележки от центральной точки моста (рис. 1). Данное явление вызывает формирование перекаса моста.

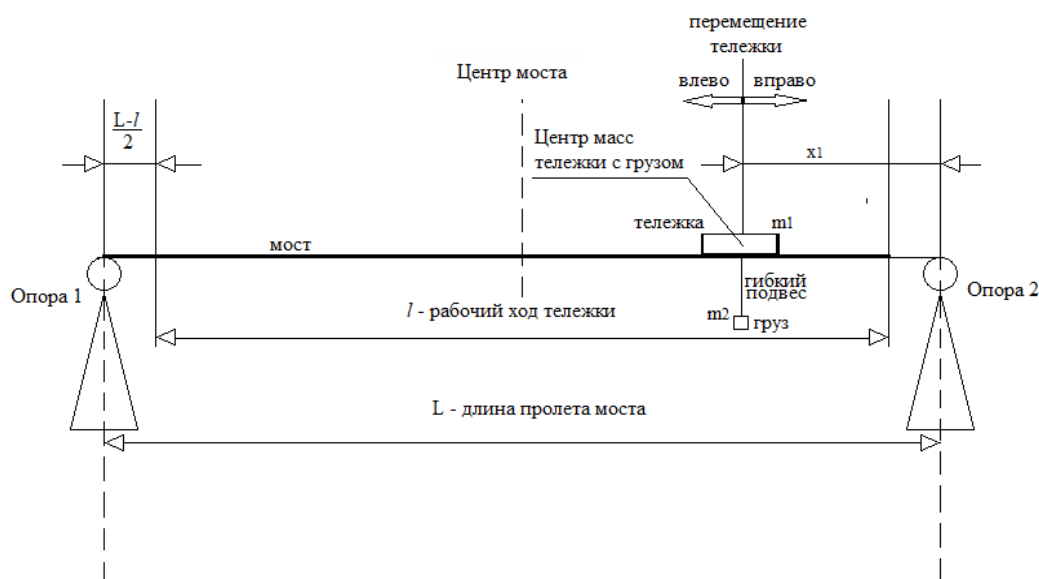


Рис. 1. Отражение процесса формирования разных нагрузок на опоры моста Fig. 1. Reflection of the process of forming different loads on bridge supports

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

В работе, при исследовании, были приняты следующие допущения – не учитывались упругие деформации вала соединяющего привода с колесами, так как его длина не значительная, следовательно, данную связь можно принять за абсолютно жесткую.

На рассматриваемом объекте привод, служащий для перемещения моста мостового крана, приводится в движение за счет двух двигателей, установленных вблизи концевых балок.

Учитывая принятое допущение, взаимовлияние всех механизмов моста представляет собой трехмассовую систему (рис. 2). В рассматриваемой схеме можно выделить приведенную массу моста J_5 (1/2 часть моста, имеющая соединение с двигателем М5), приведенную массу моста J_6 (1/2 часть моста, имеющая соединение с двигателем М6), приведенную жесткость C_m отражающая связь между J_5 и J_6 , вес моста m_m , моменты M_5 , M_6 на валу двигателей М5 и М6, статические моменты M_{c5} и M_{c6} двигателей М5 и М6, скорости ω_5 и ω_6 двигателей М5 и М6.

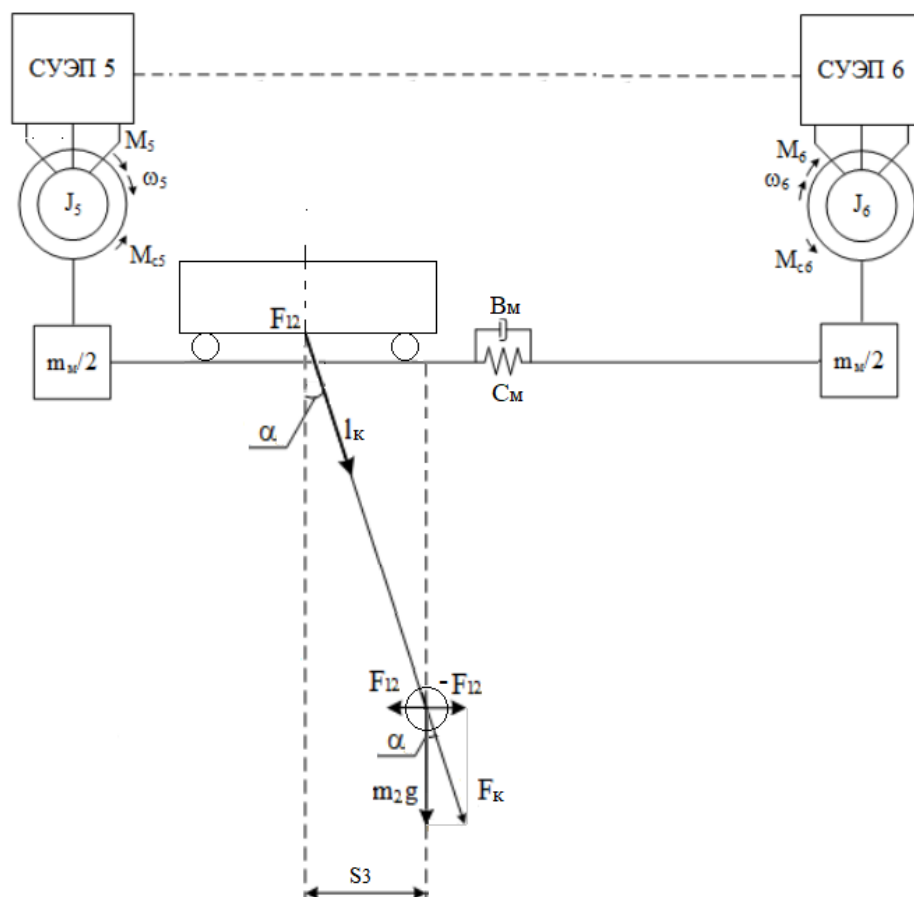


Рис. 2. Механические взаимосвязи в механизмах мостового крана

Fig. 2. Mechanical relationships in bridge crane mechanisms

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

В приведенной системе могут возникнуть момент перекоса M_{Π} вызванный колебанием груза ближе к одной из опор и моменты $M_{\Pi 5}$, $M_{\Pi 6}$ возникающие из-за движения тележки с раскачивающимся грузом по пролету моста.

Приведенная на рисунке 2 взаимосвязь отражена в виде функциональной схемы, представленной на рисунке 3.

Устранение перекоса или достижение его минимизации возможно за счет введения в систему управления блоков коррекции. Использование корректирующих структур позволяет достичь синхронизации в работе приводов моста благодаря формированию сигнала коррекции, показатели которого напрямую зависят от значения перекоса моста. Указанный сигнал оказывает воздействие на скорость движения каждой из опор моста, притормаживая одну из них и разгоняя вторую.

Рассмотрим процессы, происходящие на реальном объекте в ферме моста, их фиксация осуществлялась с помощью тензодатчиков, которые были установлены на пролетной балке механизма моста мостового крана. Полученные данные по формированию упругого момента усиливались, а затем передавались в схему измерительного моста. Вывод параметров происходил с помощью промышленного самописца. Представленная на рисунке 4 тензограмма отражает возникающую в металлической конструкции мостового крана

нагрузку, исследование, выполненное в данной работе, направлено на достижение ее минимизации. Отраженные на тензограмме низкочастотная и высокочастотная составляющие колебаний вызваны, первая – присутствующими в системе колебаниями перемещаемого груза, вторая – перекосными явлениями в ферме моста. На начальном этапе видно, что происходит разгон механизма, затем зафиксирован установившийся процесс и торможение.

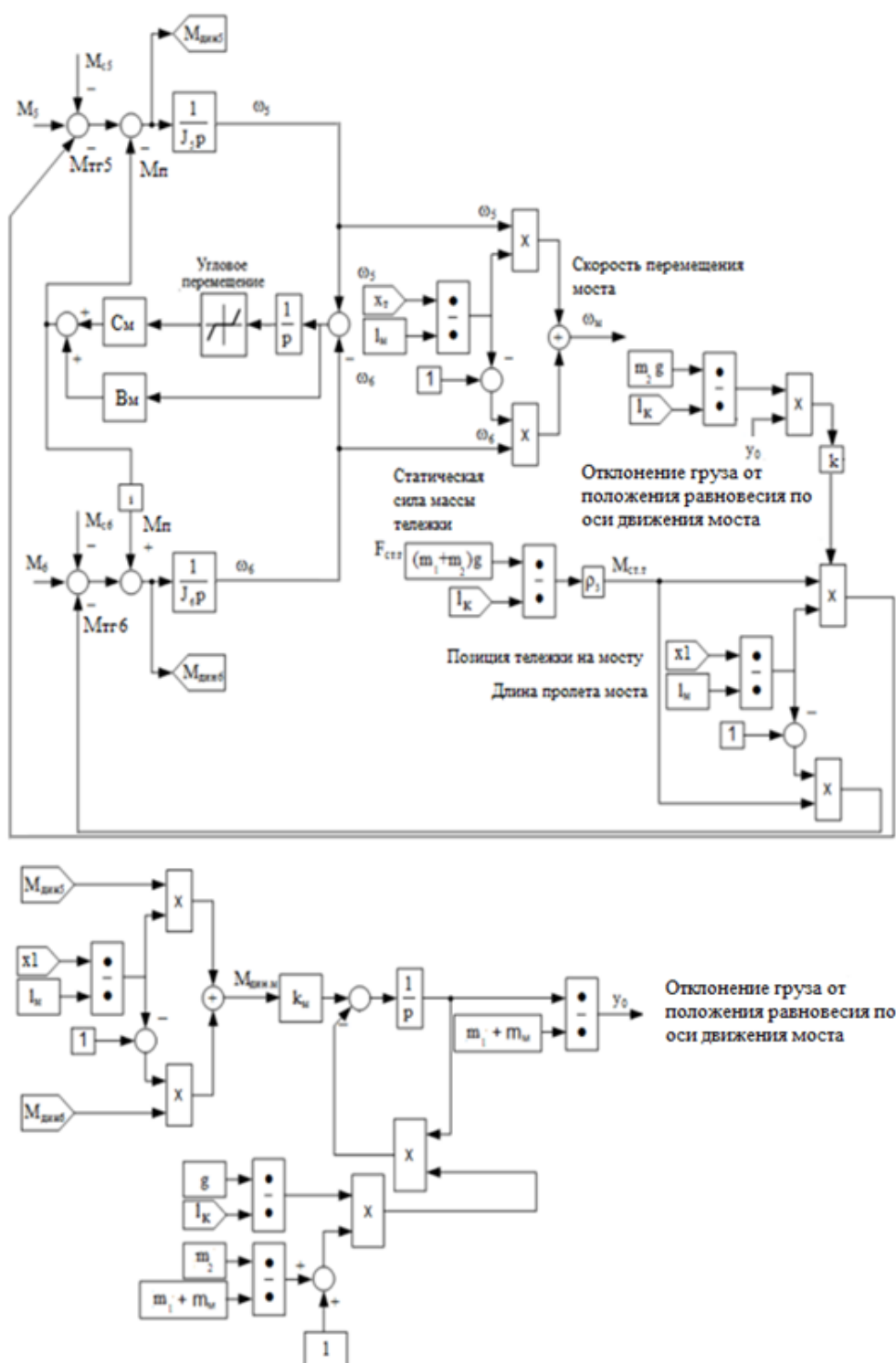


Рис. 3. Математический аппарат, описывающий процессы, происходящие при перемещении механизма моста мостового крана при наличии в структуре груза на гибком подвесе

Fig. 3. A mathematical apparatus that describes the processes occurring when the bridge mechanism of a bridge crane is moved when there is a load on a flexible suspension in the structure

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

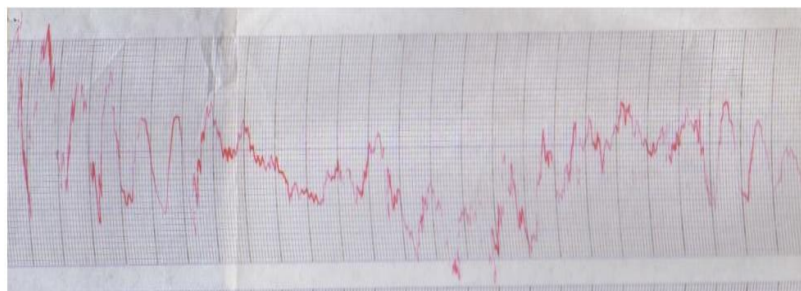


Рис. 4. Тензограмма

Fig. 4. Tensogram

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

Алгоритм отслеживания формирования перекося моста и разработка блока коррекции на базе нечеткой логики

В качестве блока коррекции предлагается внедрение в систему регулятора, функционирующего на основании нечетких правил, процесс создания предлагаемого блока, в отличие от стандартных нечетких регуляторов происходил поэтапно, без использования уже готовых специальных библиотек, имеющихся в Matlab. Предлагаемый вариант позволит снизить нагрузку на вычислительный ресурс, повысит точность настройки корректируемых параметров. Этапы разработки предлагаемого регулятора происходили с созданием блоков на каждой из ступеней согласно работе [16], в отличие от стандартного регулятора, структура которого уже реализована в Matlab, в нее необходимо ввести только правила, задать параметры, к которым будет в процессе работы обращаться стандартный нечеткий регулятор.

Функционирование предлагаемого регулятора происходит на основании формирования определенных этапов, прежде чем начинать разработку нечеткого регулятора, необходимо определиться с методикой, на основании которой он будет функционировать, приводя к ограничению перекося моста. Процесс обеспечения синхронизации скоростей двигателей моста возможен за счет формирования сигнала коррекции в каждой из систем управления двигателями. Установка на опоры индуктивных датчиков позволит на основании данных с них формировать представление о смещении перемещающегося моста относительно центральной оси. Аналоговые сигналы с датчиков формируют пропорциональные данные на основании замера расстояния от датчика до рельса, по которому движутся каждая из опор (рис. 5).

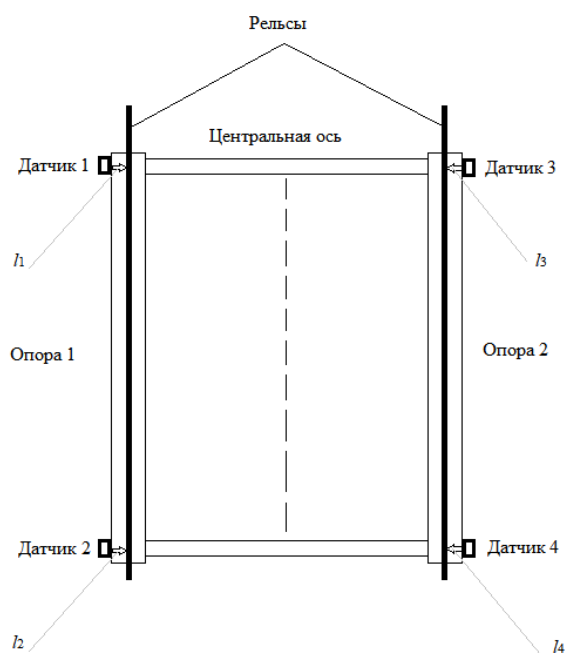


Рис. 5. Структура процесса передвижения моста по рельсам

Fig. 5. Structure of the process of moving a bridge along rails

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

Чем меньше нагружена опора, тем быстрее она будет двигаться, опора ближе к которой происходит смещение относительно центральной оси тележки с грузом будет отставать. При перемещении моста, в зависимости от показателей с датчиков возможны следующие варианты движения моста:

– отсутствует перекося, если:

$$\Delta 1_{\text{опоры}} = l_1 - l_2 = 0 \text{ и } \Delta 2_{\text{опоры}} = l_3 - l_4 = 0;$$

– мост движется вперед, повышенная нагрузка формируется на опору 1:

$$\Delta 1_{\text{опоры}} = l_1 - l_2 > 0, \Delta 2_{\text{опоры}} = l_3 - l_4 < 0;$$

– мост движется назад, повышенная нагрузка формируется на опору 2:

$$\Delta 1_{\text{опоры}} = l_1 - l_2 > 0, \Delta 2_{\text{опоры}} = l_3 - l_4 < 0;$$

– мост движется вперед, повышенная нагрузка формируется на опору 2:

$$\Delta 1_{\text{опоры}} = l_1 - l_2 < 0, \Delta 2_{\text{опоры}} = l_3 - l_4 > 0;$$

– мост движется назад, повышенная нагрузка формируется на опору 1:

$$\Delta 1_{\text{опоры}} = l_1 - l_2 > 0, \Delta 2_{\text{опоры}} = l_3 - l_4 > 0.$$

Под V_m принято направление в котором перемещается мост, в математическом аппарате описывающем устранение перекося оно отражается знаком, если перемещении происходит вперед, то с блока sign выдается 1, при движении назад минус 1 (рис. 6).

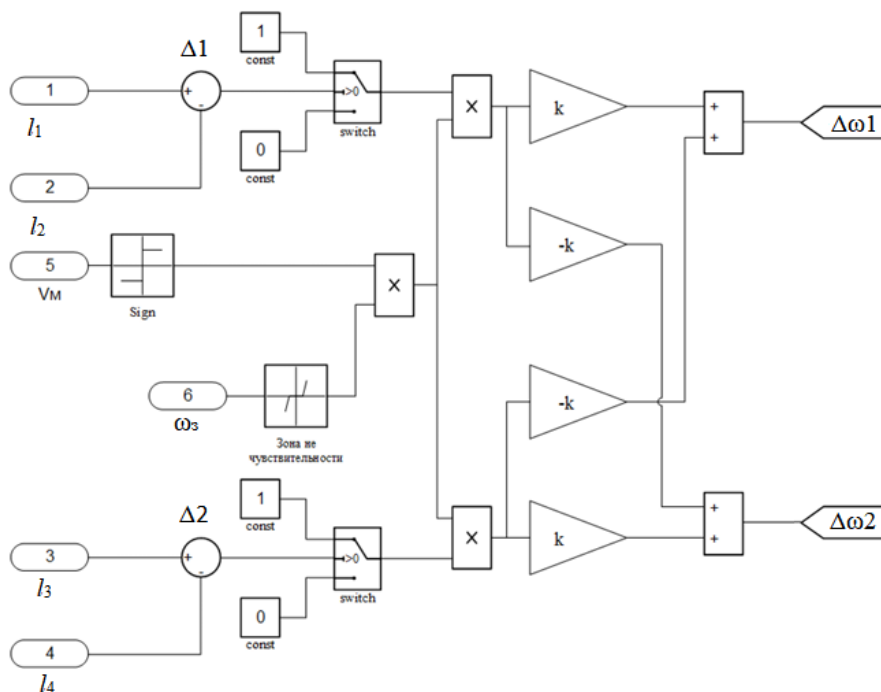


Рис. 6. Методика устранения перекося

Fig. 6. Method for correcting skew

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

Все корректирующие мероприятия формируются в установившемся режиме. Входными сигналами в рассматриваемой методике являются данные полученные с датчиков l_1, l_2, l_3, l_4 , направление перемещения моста V_m , сигнал формирующий задание на скорость перемещения моста ω_z , на выходе формируются данные с корректирующими сигналами на изменение скорости первой $\Delta\omega_1$ и второй $\Delta\omega_2$ опоры.

Для разработанного нечеткого регулятора на основании [16] входными сигналами являются данные с датчиков l_1, l_2, l_3, l_4 , а выходными сигналами величина корректировки скорости первой $\Delta\omega_1$ и второй $\Delta\omega_2$ опоры.

В среде Matlab собрана разработанная двухдвигательная система управления (рис. 7).

Моделирование проводилось без использования блока коррекции перекося моста и с наличием в системе управления системы коррекции, функционирующей на основании рассмотренного метода снижения перекося моста (рис. 6) и с разработанным поэтапно нечетким регулятором (рис. 8). Представленные графики показывают, что процесс разгона формируется без ввода в систему управления блока коррекции, это видно по формирующемуся рассогласованию в движении первой и второй опоры, как только система переходит в установившийся режим, происходит введение блока коррекции, что позволяет постепенно свести к минимуму рассогласование в движении опор моста.

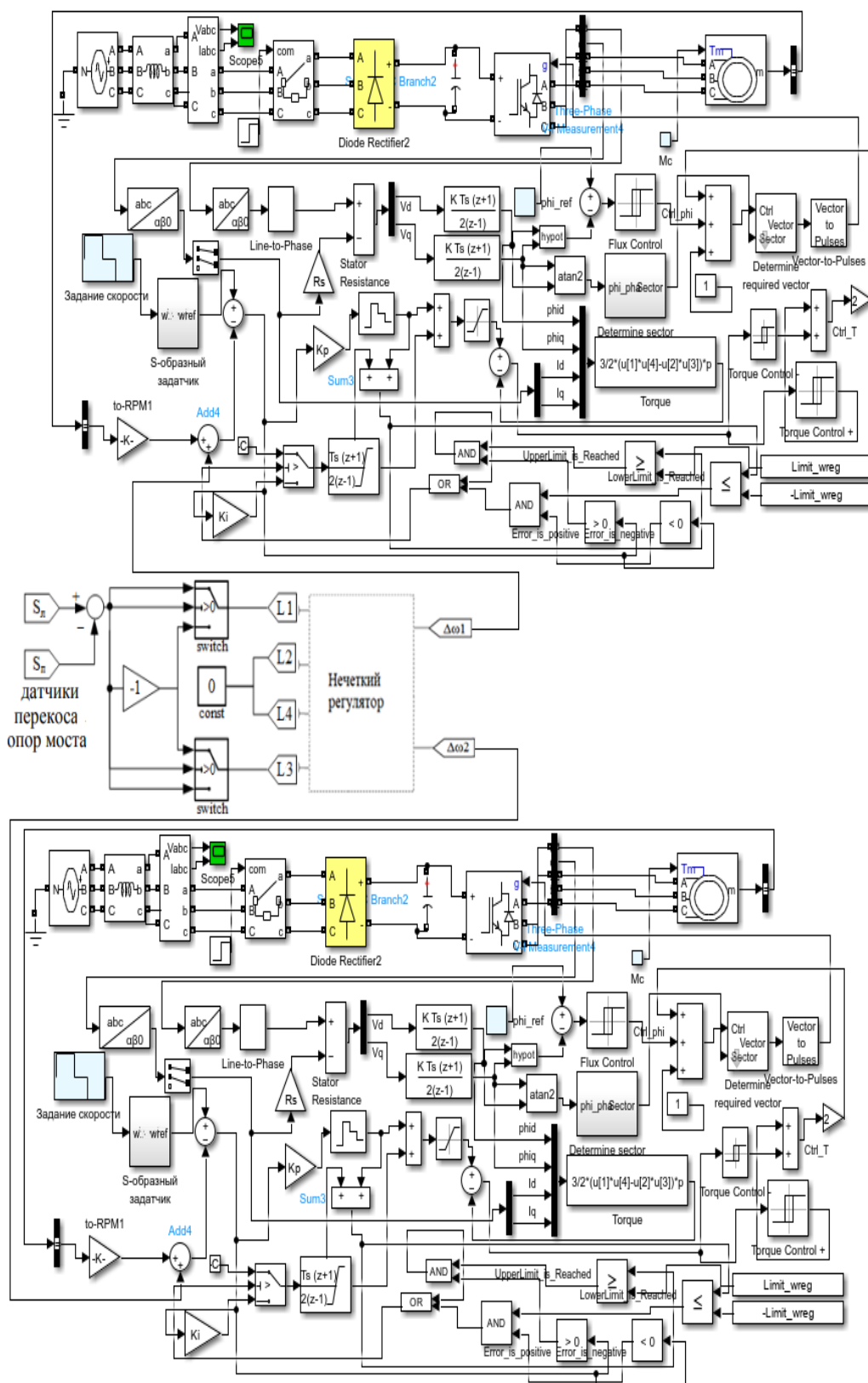


Рис. 7. Двухдвигательная система с блоком Fig. 7. A system with an unadaptive observer коррекции

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

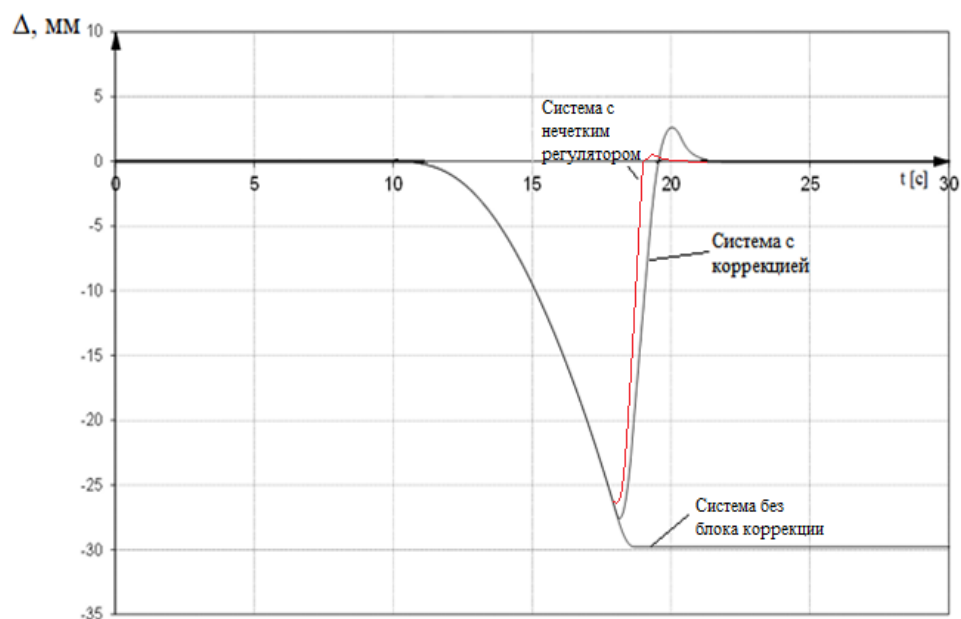


Рис. 8. Характеристики, показывающие интенсивность формирования скорости в исследуемых системах
Fig. 8. Characteristics showing the nature of velocity formation in the studied systems

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

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Рассмотрим графики формирования перекоса моста M_{Π} и приводного момента M_1 и M_2 (рис. 9) при внедрении в системы управления приводами моста блока коррекции. При пуске блок коррекции не включен, как только система выходит на установившийся режим, блок синхронизации скоростей вводится в систему управления, приблизительно на 20 секунде, что приводит к устранению перекоса и выравниванию моментов.

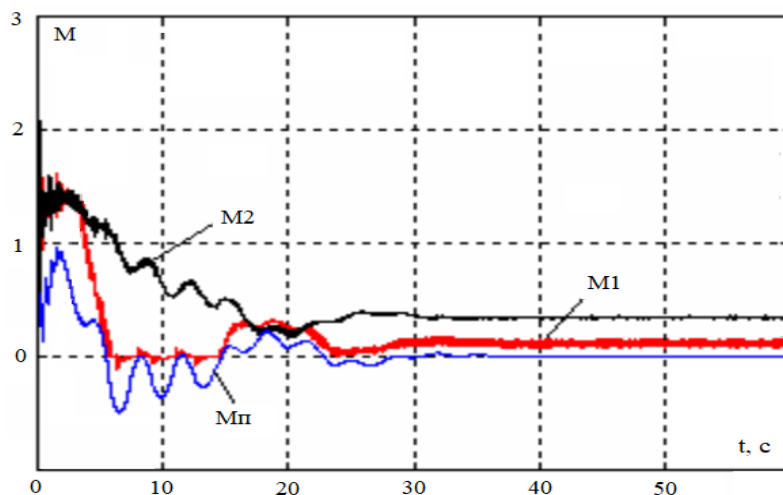


Рис. 9. Кривые, показывающие формирование перекоса моста (M_{Π}), приводных моментов (M_1 и M_2) в системе с блоком коррекции
Fig. 9. Curves showing the formation of the bridge misalignment (M_{Π}), driving torques (M_1 and M_2) in a system with a correction unit

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

На реальном объекте также были проведены исследования при отсутствии и наличии в системе управления блоков синхронизации скоростей опор крана (рис. 10).

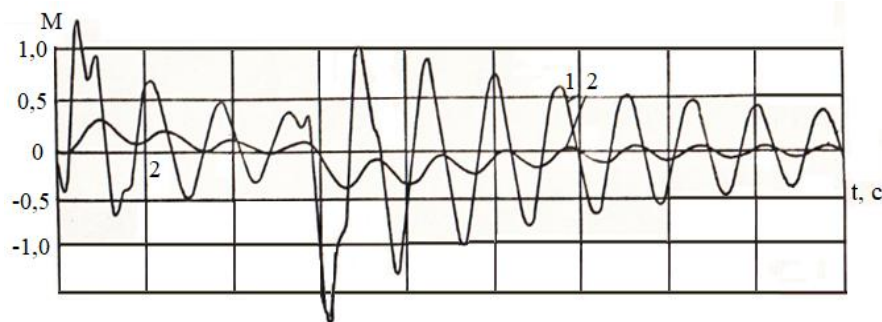


Рис. 10. Формирование упругих усилий возникающих в ферме моста в системе, не имеющей блок коррекции скоростей (1) и в системе с блоком коррекции скоростей (2)

Fig. 10. Formation of elastic forces in the bridge farm in a system without a speed correction unit (1) and in a system with a speed correction unit (2)

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

Представленные кривые позволяют сделать вывод о работоспособности предлагаемого решения, направленного на достижение синхронизации скоростей за счет внедрения в систему управления блоков коррекции скоростей движения правой и левой опор. Происходит заметное снижение амплитуды упругих колебаний до 45 процентов, что ведет к повышению безаварийной работы электромеханической системы, за счет снижения нагрузки на нее.

Выводы (Conclusions)

Внедрение в систему управления блока устранения перекоса на базе разработанного нечеткого регулятора позволило устранить рассогласование в движении опор моста и снизить нагрузку на металлоконструкцию моста.

Литература

1. Пат. 97971 Российская Федерация, МПК В60L15/20. Устройство автоматического ограничения перекоса опор мостового крана, Щедринов А. В.; заявитель: Щедринов А.В., Коврыжкин А.А., Колмыков В.В. № 2010109170/22; заявка от 11.03.2010; опубл. 27.09.2010. Бюл. № 27. с.
2. Либерман Я.Л. Современные системы автоматического устранения перекоса моста при эксплуатации кранов // Сб. докладов и сообщений V Уральского конгресса ПТО. – Екатеринбург: Уральский экспертный центр. 2012.
3. Пат. 127374 Российская Федерация, МПК В66С 17/00. Система управления перемещением мостового крана, Либерман Я.Л.; заявитель: Либерман Я.Л. № 2012150896/11; заявка от 27.11.2012; опубл. 27.04.2013. Бюл. № 12.
4. Пат. 119734 Российская Федерация, МПК В66С 13/18. Устройство ограничения перекоса мостового крана, Кочевин Д.В.; заявитель: Кочевин Д.В., Федяева Г.А. № 2012115599/11; заявка от 18.04.2012; опубл. 27.08.2012. Бюл. № 24.
5. Пат. 119734 Российская Федерация, МПК В66С 13/18. Устройство ограничения перекоса мостового крана, Кочевин Д.В.; заявитель: Кочевин Д.В., Федяева Г.А. № 2012115599/11; заявка от 18.04.2012; опубл. 27.08.2012. Бюл. № 24.
6. Козярук А.Е. Современные эффективные электроприводы производственных и транспортных механизмов // Электротехника. – 2019. №3. С. 33-37.
7. 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.
8. 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.
9. Пат. 164799 Российская Федерация, МПК В66С 9/105В 19/02, H02Р 5/52, H02Р 21/06, G. Система автоматического управления асинхронным электроприводом передвижения с коррекцией поперечного смещения, Федяева Г.А.; Заявитель: Федяева Г.А., Кочевин Д.В., Смородова Т.В., Конохов Д.В., Бойко В.Н. № 2015127272/11; заявка от 07.07.2015; опубл. 20.09.2016. Бюл. № 26.
10. Мещеряков В.Н., Колмыков В.В., Ласточкин Д.В. Разработка системы автоматического ограничения перекоса фермы мостового крана // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век:

материалы XVI международной научно-практической конференции. Орел, 26-28 сентября 2018 г. С. 30-37.

11. 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>

12. Jian Z., Zhibin W., Haiqiang L. Modal Analysis and Structure Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor // IEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. No.10. pp. 1-11.

13. Sayali S. Patil, Vijayraj Wanaskar, P.D. Shendge, Phadke S. B. Sliding Mode and Inertial Delay Based Direct Yaw Moment Control for AGVs // 2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Maharashtra, India. 20593534. (2-4 April 2021).

14. Синюков А.В., Абдуллазянов Э.Ю., Заруцкий Н.Н., Синюкова Т.В., Грачева Е.И. Использование аппарата на базе нечеткой логики для демпфирования колебаний гибкоподвешенного груза. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024; 26(3): 33-49. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-3-33-49>.

15. 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.

16. Вълчев С., Синюков А.В., Мещеряков В.Н., Синюкова Т.В. Разработка нечеткого регулятора для демпфирования колебаний гибкоподвешенного груза в электромеханических системах крановых механизмов // Электричество. – 2025 г. № 4. С. 13-27.

Авторы публикации

Синюков Алексей Владимирович – ассистент, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия, технический писатель ООО «Грин-АПИ», г. Химки, Россия. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, E-mail: zeitsn@yandex.ru

Синюкова Татьяна Викторовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизированного электропривода и робототехники» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, Россия. E-mail: stw0411@mail.ru

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

Сафронов Алексей Анатольевич – д-р техн. наук, член-корр., профессор, заведующий отделением плазменных устройств и технологий, Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, г. Санкт-Петербург, Россия.

References

1. Pat. 97971 Russian Federation, IPC B60L15/20. Device for automatic limitation of bridge crane support tilt, Shchedrinov A. V.; applicant: Shchedrinov A. V., Kovryzhkin A. A., Kolmykov V. V. No. 2010109170/22; application dated 11.03.2010; published 27.09.2010. Bulletin No. 27. p.

2. Liberman Ya. L. Modern systems for automatic elimination of bridge tilt during crane operation // Collection of reports and communications of the V Ural Congress of Industrial and Technical Equipment. – Ekaterinburg: Ural Expert Center. 2012.

3. Pat. 127374 Russian Federation, IPC B66C 17/00. Overhead Crane Movement Control System, Liberman Ya.L.; applicant: Liberman Ya.L. No. 2012150896/11; application dated 27.11.2012; published 27.04.2013. Bulletin No. 12.

4. Pat. 119734 Russian Federation, IPC B66C 13/18. Overhead Crane Skew Limitation Device, Kochevinov D.V.; applicant: Kochevinov D.V., Fedyayeva G.A. No. 2012115599/11; application dated 18.04.2012; published 27.08.2012. Bulletin No. 24.

5. Pat. 119734 Russian Federation, IPC B66C 13/18. Device for limiting the tilt of an overhead crane, Kochevinov D.V.; applicant: Kochevinov D.V., Fedyayeva G.A. No. 2012115599/11; application dated 18.04.2012; published 27.08.2012. Bulletin No. 24.

6. Kozyaruk A.E. Modern efficient electric drives of production and transport mechanisms // Electrical Engineering. - 2019. No. 3. P. 33-37.

7. 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.

8. 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.

9. Pat. 164799 Russian Federation, IPC B66C 9/105B 19/02, H02P 5/52, H02P 21/06, G. Automatic control system for an asynchronous electric travel drive with lateral displacement correction, Fedyaeva G.A.; Applicant: Fedyaeva G.A., Kochevinov D.V., Smorudova T.V., Konokhov D.V., Boyko V.N. No. 2015127272/11; application dated 07.07.2015; published 20.09.2016. Bulletin No. 26.

10. Meshcheryakov V.N., Kolmykov V.V., Lastochkin D.V. Development of a system for automatic limitation of the truss tilt of an overhead crane // Energy and resource saving - XXI century: materials of the XVI international scientific and practical conference. Orel, September 26-28, 2018. Pp. 30-37.

11. 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>.

12. Jian Z., Zhibin W., Haiqiang L. Modal Analysis and Structure Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor // IEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. No.10. pp. 1-11.

13. Sayali S. Patil, Vijayraj Wanaskar, P.D. Shendge, Phadke S. B. Sliding Mode and Inertial Delay Based Direct Yaw Moment Control for AGVs // 2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Maharashtra, India. 20593534. (2-4 April 2021).

13. Abdelaal AK, Shaheen AM, El-Fergany AA, et al. Sliding mode control based Dynamic Voltage Restorer for Voltage Sag Compensation. Results in Engineering. 2024; 24(102936):1-12. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102936.

14. Sinyukov A.V., Abdullazyanov E.Yu., Zarutsky N.N., Sinyukova T.V., Gracheva E.I. Using a fuzzy logic-based device to dampen oscillations of a flexibly suspended load. News of higher educational institutions. PROBLEMS OF ENERGY. 2024; 26(3): 33-49. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-3-33-49>.

15. 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.

16. Valchev S., Sinyukov A.V., Meshcheryakov V.N., Sinyukova T.V. Development of a fuzzy controller for damping oscillations of a flexible-suspended load in electromechanical systems of crane mechanisms // Elektrichestvo. – 2025. No. 4. Pp. 13-27.

Authors of the publication

Alexey V. Sinyukov – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia, ООО «Grin-API», Khimki, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, E-mail: zeitsn@yandex.ru

Tatyana V. Sinyukova – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: stw0411@mail.ru

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

Aleksei A. Safronov – Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено 22.07.2025 г.

Отредактировано 27.07.2025 г.

Принято 12.08.2025 г.



ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ 10 КВ

Куликов А.Л., Старшов И.С.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород, Россия
ivanstarsh@yandex.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Распределительные электрические сети обладают наибольшей протяженностью в энергосистеме России, при этом самым распространённым типом повреждения в них является однофазное замыкание на землю. Селективное выявление повреждённой кабельной линии поможет избежать перетекания однофазного замыкания на землю в двухфазное и трёхфазное, что повысит надёжность электроснабжения потребителей. **ЦЕЛЬ.** Многопараметрический способ защиты от однофазных замыканий на землю использует несколько параметров электрических величин для определения режима сети, что позволяет сделать защиту селективной и более чувствительной. Разные параметры электрических величин могут представлять различную ценность для задачи распознавания режима. Целью исследования является изучение параметров токов и напряжений, которые могут быть использованы для релейной защиты от однофазных замыканий на землю, а также анализ возможности распознавания режима сети по различным информационным параметрам. **МЕТОДЫ.** Для получения статистики о возможных режимах использовалось имитационное моделирование кабельной сети 10 кВ в программном комплексе Matlab в пакете расширения Simulink. Полученные в результате моделирования значения токов и напряжений нулевой последовательности обрабатывались с применением дискретного преобразования Фурье с целью фильтрации гармоник и получения их квадратурных составляющих. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Предложены упрощённые структурно-функциональные схемы пусковых органов защиты от однофазных замыканий на землю. Установлено, что зависимости параметров электрических величин на графиках отображают области, различные для внутренних и внешних установившихся однофазных замыканий на землю и дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю. Дополнительно выявлено, что области существования различных режимов имеют взаимные пересечения. **ВЫВОДЫ.** Результаты исследования могут быть использованы для реализации многопараметрической защиты в распределительных сетях 6–35 кВ.

Ключевые слова: защита от замыкания на землю; изолированная нейтраль; многопараметрическая защита; дискретное преобразование Фурье; дуговое перемежающееся однофазное замыкание на землю; однофазное замыкание на землю; распознавание режима.

Для цитирования: Куликов А.Л., Старшов И.С. Исследование диагностических параметров режима однофазных замыканий на землю в электросетях 10 кВ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 42-55. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-42-55.

STUDY OF MODE RECOGNITION IN 10 KV CABLE NETWORKS FOR ORGANIZING PROTECTION AGAINST SINGLE-PHASE GROUND FAULTS

Kulikov A.L., Starshov I.S.

Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseev (NNSTU), Nizhny Novgorod,
Russia
ivanstarsh@yandex.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Distribution networks account for the largest share of Russia's power grid. The most common fault type in these networks is a single-phase ground fault. Selective identification of the faulty cable line can prevent its escalation into a three-phase fault, improving power supply reliability. *PURPOSE.* A multiparameter method of ground fault protection uses several electrical quantities to determine the network mode. This method makes the protection selective and more sensitive. Different electrical quantities are of different value for the mode recognition task. The goal of the research is to study the parameters of current and voltage that are used for relay protection. Investigation of the ability to recognize network mode based on this parameters. *METHODS.* We obtained statistics by using simulation modeling of the cable network in the Matlab software package in the Simulink expansion package in all possible modes. And then we used discrete Fourier transform of the full period to obtain filtered harmonics and quadrature components of the values of zero-sequence currents and voltages. *RESULTS.* The article describes the block and functional diagrams of measuring elements that uses the dependencies of electrical quantities are proposed. The article determines the areas formed by electrical quantities on the graph in different modes such as internal and external steady-state single-phase ground faults and arc intermittent single-phase ground faults. The graph consists of the dependence of two electrical quantities. It was also revealed that the areas of different modes have mutual intersections. *CONCLUSIONS.* The results of the study are suitable for the implementation of multiparameter protection.

Keywords: *ground fault protection; isolated neutral; multiparameter protection; discrete Fourier transform; intermittent arc single-phase ground fault; single-phase ground fault; mode recognition.*

For citation: Kulikov A.L., Starshov I.S. Study of mode recognition in 10 kV cable networks for organizing protection against single-phase ground faults. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (4): 42-55. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-42-55.

Введение (Introduction)

Проблемы защит от замыканий на землю (ОЗЗ) в сетях 6–35 кВ в России обуславливается историческим развитием сетей указанного класса напряжения в первой половине XX века. В целях обеспечения бесперебойности электроснабжения активно применялись сети с изолированной нейтралью, что позволяло сохранять в работе электроустановки потребителей при возникновении ОЗЗ.

Однако длительная работа кабельных распределительных сетей 6–10 кВ при ОЗЗ недопустима, из-за риска их перехода в многофазные короткие замыкания. Несмотря на большое количество работ [1-15], связанных с реализацией защит от ОЗЗ, проблема распознавания режимов распределительных сетей с изолированной нейтралью при различных ОЗЗ остается актуальной.

Наибольшее распространение получили токовые направленные и ненаправленные защиты нулевой последовательности, используемые в сетях с изолированной нейтралью. Недостатком токовой ненаправленной защиты нулевой последовательности (ТЗНП) является ограниченная селективность и чувствительность в режиме дуговых перемежающихся однофазных замыкания на землю (ДПОЗЗ) [6, 7]. Ненаправленные защиты могут применяться не на всех присоединениях, так как существует ограничение по собственному емкостному току присоединения. Поэтому используются токовые направленные защиты нулевой последовательности, имеющие меньшую эксплуатационную надёжность [8]. Основной недостаток защит, использующих проводимость нулевой последовательности, состоит в их неустойчивости при дуговых ОЗЗ, что уменьшает чувствительность и область их применения [9].

В эксплуатационной практике распределительных электрических сетей также применяются защиты, основанные на контроле высших гармоник в токе нулевой последовательности. Но на их эффективность сильное влияние оказывают стабильность состава и уровень высших гармоник в токе нулевой последовательности [7, 15].

Таким образом, существующие решения защит от ОЗЗ имеют ряд недостатков таких, как ограничения по области применения, а также в некоторых случаях недостаточные чувствительность и селективность при дуговых перемежающихся замыканиях на землю.

Следует отметить, что каждая из защит использует лишь один информативный параметр токов (напряжений) для выявления ОЗЗ. Для улучшения характеристик защиты

предлагается одновременное использование нескольких параметров, то есть переход к многопараметрической защите. Причем, некоторые параметры обладают большей информативностью для распознавания режима распределительной сети, что должно быть учтено в логике защиты при ее технической реализации. Целесообразно использование имитационного моделирования сложных переходных процессов, возникающих в результате различных видов ОЗЗ в распределительной сети, с последующим накоплением и анализом данных для распознавания ее режимов.

Целью статьи является исследование распознаваемости режимов в условиях различных ОЗЗ и определение информативности отдельных признаков, характеризующих ОЗЗ.

Научная значимость исследования состоит в анализе параметров электрических величин, пригодных для распознавания режима распределительной сети при ОЗЗ. Практическая значимость исследования заключается в том, что в дальнейшем эти параметры могут быть использованы для организации многопараметрической защиты, которая перспективна при реализации в составе микропроцессорного устройства релейной защиты сетей 6–35 кВ.

Материалы и методы (Materials and methods)

Исследование проводилось с использованием имитационного моделирования кабельной сети 10 кВ. Модель реализована в программном комплексе *Matlab* в пакете расширения *Simulink*.

При ОЗЗ в кабельной сети возникает сложный переходный процесс, который можно разделить на две стадии, связанные с разрядом емкостей поврежденной фазы на землю, сопровождающийся перезарядом междуфазных емкостей, и зарядом емкостей неповрежденных фаз соответственно. Параметры основных частотных составляющих (зарядной и разрядной) определяются практически только суммарными емкостями и проводимостями фаз сети на землю и между фазами неповрежденной части сети, параметрами поврежденной линии на участке от шин до точки ОЗЗ и переходным сопротивлением в месте повреждения [10]. На величину токов в установившемся режиме в основном влияют емкости фаз сети на землю [11].

Формирование имитационной модели требует некоторых упрощений, так как реальная кабельная сеть содержит множество линий. Использование для всех линий модели с распределенными параметрами, приведет к решению систем дифференциальных уравнений высокого порядка и потребует длительных расчетов, а также большой вычислительной мощности. Для уменьшения количества расчетов имитационная модель максимально упрощается, путём представления кабельной сети как одного элемента, а исследуемого кабельного присоединения, как кабельной линии с распределенными параметрами.

На рисунке 1 изображена расчетная схема замещения распределительной сети и содержит следующие обозначения: $R_{\text{л}}, R_{\text{лэ}}$ – активные сопротивления линий; $L_{\text{л}}, L_{\text{лэ}}$ – индуктивности линий; $G_0, G_{0э}$ – активные проводимости изоляции фаз относительно земли; $C_0, C_{0э}$ – емкости фаз относительно земли; $G_m, G_{mэ}$ – междуфазные активные проводимости изоляции фаз; $C_m, C_{mэ}$ – междуфазные емкости фаз.

Так как переходные токи ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ в диапазоне частот до 1,5–2 кГц сохраняют практически емкостный характер [12], в качестве упрощенного эквивалента внешней сети можно принять схему замещения, состоящую из емкостей и активных проводимостей фаз на землю $C_{0э}$ и $G_{0э}$, а также емкостей и активных проводимостей между фазами $C_{mэ}$ и $G_{mэ}$. Значения частот, выходящие за указанный диапазон, не рассматриваются, так как обладают меньшей информативностью [9].

Выбор емкостных и активных проводимостей фаз на землю $C_{0э}$ и $G_{0э}$ в эквивалентной схеме производится так, чтобы суммарный емкостный ток сети I_{Σ} и его активная составляющая $I_{\text{аэ}}$ не изменились, а значения междуфазных емкостей и проводимостей принимаются такими, чтобы соотношения $C_{0э}/C_{mэ}$ и $G_{0э}/G_{mэ}$ были равны соответствующим соотношениям в полной схеме сети [13].

Схема замещения для моделирования переходного процесса в однолинейном виде представлена на рисунке 2а. Внешняя сеть в ней представлена в эквивалентном виде на рисунке 2б.

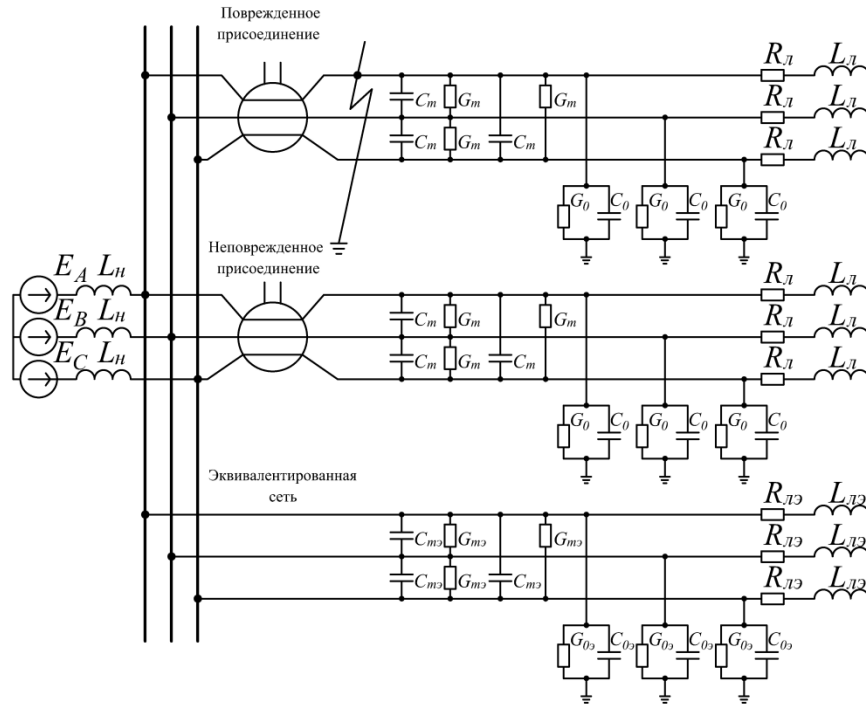


Рис. 1. Расчетная схема замещения сети

Fig. 1. Equivalent circuit of the network

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

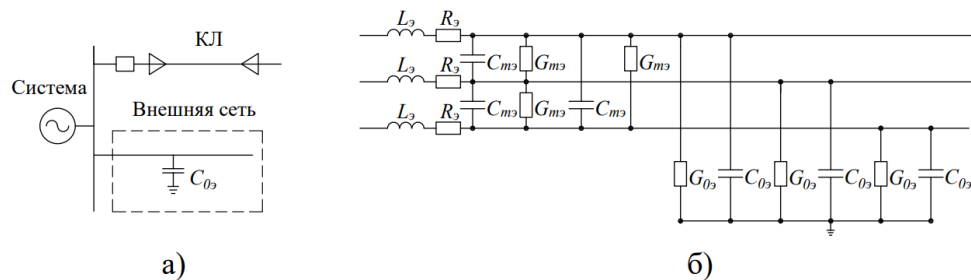


Рис. 2. Эквивалентирование кабельной сети 10 кВ для исследования переходных процессов при ОЗЗ:

Fig. 2. Equivalence of a 10 kV cable network for the study of single-phase ground faults:

а) однолинейная схема сети;

a) single-line network layout;

б) схема замещения внешней сети

b) the equivalent circuit of the external network

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

Имитационная модель сети составлена из следующих функциональных компонентов:

1) Эквивалентированная часть системы задавалась с использованием блоков трёхфазных сопротивлений *Three-Phase Parallel RLC Branch* для задания емкостей и активных проводимостей фаз на землю, а также емкостей и активных проводимостей между фазами, и блока трёхфазного индуктивного сопротивления с взаимной индуктивной связью между фазами *Three-Phase Mutual Inductance Z1-Z0* для задания индуктивного сопротивления кабельной сети. Параметры сети, заданные в соответствии с техническими характеристиками кабелей с бумажно-масляной изоляцией, представлены в таблице 1.

В связи с тем, что эквивалентная емкость при параллельном соединении конденсаторов суммируется, общая емкость для схемы замещения определяется, согласно рисунке 2, как

$$C_{03} = \sum C_0,$$

где C_0 – емкости фаз относительно земли кабельной линии; C_{03} – эквивалентная емкость фаз относительно земли.

Токи, вызванные активными проводимостями фаз сети на землю, задавались,

исходя из условия, что они не должны превышать 2-6% емкостных токов [6].

Таблица 1
Table 1

Параметры эквивалентированной части системы
Parameters of the equivalent part of the system

Диапазон значений	Cm, Ф	C0, Ф	Rm, Ом	R0, Ом	R1э, Ом	L1э, Гн	R0э, Ом	L0э, Гн
Начальное значение	$4,56 \cdot 10^{-7}$	$2,10 \cdot 10^{-6}$	$6,98 \cdot 10^4$	$1,51 \cdot 10^4$	$3,29 \cdot 10^{-1}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$7,86 \cdot 10^{-1}$	$4,03 \cdot 10^{-4}$
Конечное значение	$9,41 \cdot 10^{-7}$	$4,34 \cdot 10^{-6}$	$3,38 \cdot 10^4$	$7,34 \cdot 10^3$	$3,29 \cdot 10^{-1}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$7,86 \cdot 10^{-1}$	$4,03 \cdot 10^{-4}$

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

2) Моделирование линий осуществлялось с использованием стандартного блока линии с распределёнными параметрами *Distributed Parameters Line* пакета *SimPowerSystem*. Параметры линий представлены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Параметры кабельных линий
Parameters of cable lines

Сечение участка	R1, Ом/км	R0, Ом/км	L1, Гн/км	L0, Гн/км	C1, Ф/км	C0, Ф/км
Характеристики линии						
3x240	0,549	1,31	$1,879 \cdot 10^{-4}$	$6,720 \cdot 10^{-4}$	$2,919 \cdot 10^{-7}$	$9,719 \cdot 10^{-8}$
3x95	0,405	2,1	$1,815 \cdot 10^{-4}$	$2,525 \cdot 10^{-3}$	$2,919 \cdot 10^{-7}$	$9,719 \cdot 10^{-8}$
3x50	0,769	2,6	$1,911 \cdot 10^{-4}$	$3,067 \cdot 10^{-3}$	$2,919 \cdot 10^{-7}$	$9,719 \cdot 10^{-8}$

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

3) Система представлена блоком *Three-Phase source* с межфазным напряжением 10 кВ.

4) Для создания точки ОЗЗ использовался элемент *Breaker*. Он позволяет совершать коммутации в заданные моменты времени. При моделировании устойчивого замыкания на землю реализовалась однократная коммутация элемента *Breaker*. Дополнительно учитывалось возникновение электрической дуги, которая влияет на гармонический состав тока ОЗЗ. Для реализации дуги в цепь протекания тока ОЗЗ были включены два параллельно-встречно включенных диода. Противоположно-ЭДС моделировалась напряжением отсечки диода, а активное сопротивление дуги – динамическим сопротивлением диода [10].

Для моделирования перемежающегося замыкания на землю, коммутации осуществлялись через небольшие промежутки времени, что позволяет имитировать вероятностный характер возникновения дуги при ОЗЗ.

Гашения заземляющей дуги происходили при первом переходе через нулевое значение зарядной (среднечастотной) составляющей переходного тока ОЗЗ. Повторные зажигания дуги выполнялись через минимальные интервалы времени, равные половине периода рабочей частоты [9].

На рисунке 3 представлена осциллограмма тока наиболее опасного вида дугового перемежающегося ОЗЗ. Пробой происходит через интервалы времени, равные 20 и 10 мс. Затем замыкание переходит в устойчивое однофазное замыкание на землю.

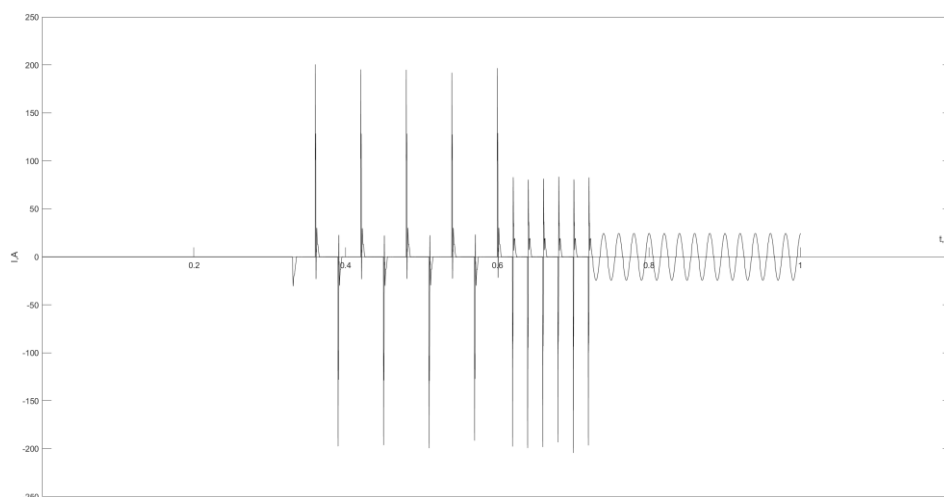


Рис. 3. Осциллограмма тока дугового перемежающегося ОЗЗ Fig. 3. The oscillogram of arc single-phase ground fault

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

Для проведения моделирования выбрана сеть 10 кВ, применяемая при испытаниях микропроцессорных устройств релейной защиты¹. Используемая сеть с изолированной нейтралью представлена пятью радиальными распределительными линиями, отходящими от одной из секций шин.

Имитационная модель эквивалентированной кабельной сети 10 кВ в программном комплексе *Matlab* представлена на рисунке 4.

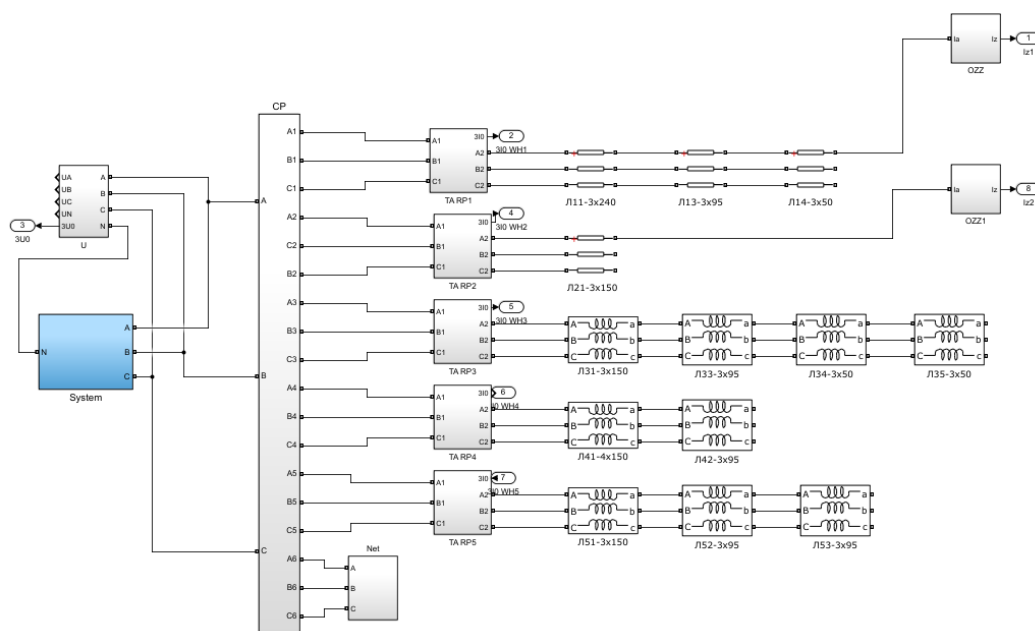


Рис. 4. Имитационная модель эквивалентированной кабельной сети в программном комплексе *Matlab* Fig. 4. Simulation model of an equivalent cable network in the Matlab software package

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

В отличие от защит, использующих действующие значения токов и напряжений [6, 9], в многопараметрической защите для расширения информационной базы предполагается применение их комплексных значений, а также различных функций (активные и реактивные проводимости, мощности и др.), в том числе полученные в заданных частотных диапазонах. Формирование требуемых для защиты от ОЗЗ параметров выполнялось с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) с

¹СТО 56947007- 29.120.70.241-2017 «Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.rosseti.ru/upload/iblock/bc9/wgavy1h2g4grcll6x2rmxfltcjatlcfk.pdf> (дата обращения 28.12.2024 г.)

последующей реализацией расчетных алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) [14, 16]. В процессе имитационного моделирования и последующей ЦОС была задана частота дискретизации, соответствующая 256 отсчетам на период промышленной частоты и требованиям стандарта МЭК 61850.

Обобщённая блок-схема процесса исследования имитационной модели представлена на рисунке 5.

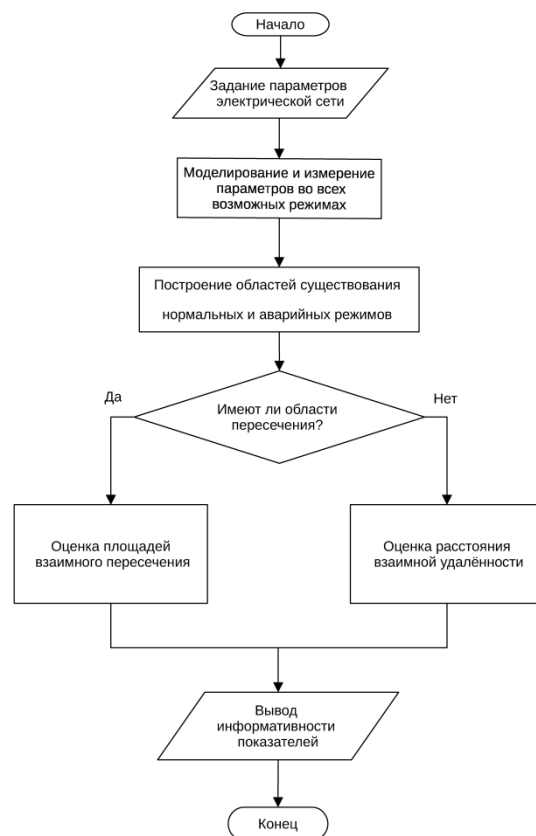


Рис. 5. Обобщённая блок-схема процесса исследования имитационной модели

Fig. 5. A flowchart of the simulation model research process

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

Результаты (Results)

Для накопления статистических данных о режимах проведено имитационное моделирование дуговых перемежающихся и установившихся ОЗЗ при различных параметрах электрической сети и ее конфигурациях, что учитывалось путём изменения характеристик модели в диапазоне параметров сети (табл. 2) и явилось главным фактором при исследовании однофазных замыканий на землю.

Хотя ток ОЗЗ протекает через все неповреждённые присоединения сети, но в интересах организации релейной защиты проводилась оценка электрических параметров на анализируемом присоединении при внутренних и внешних замыканиях на землю. Результаты имитационного моделирования отражены в виде зависимостей параметров режимов на рисунках 7, 9, 11, 13, 15.

Для определения параметров режима по активной (g_0) и реактивной (b_0) проводимости нулевой последовательности использованы нечётные гармоники частотой от 50 Гц до 1,5 кГц. Применение алгоритмов фильтрации сигнала на основе ДПФ позволило выделить квадратурные составляющие тока и напряжения. Проводимости получены путём деления комплекса тока на комплекс напряжения. Упрощенная структурная схема пускового органа защиты представлена на рисунке 6.

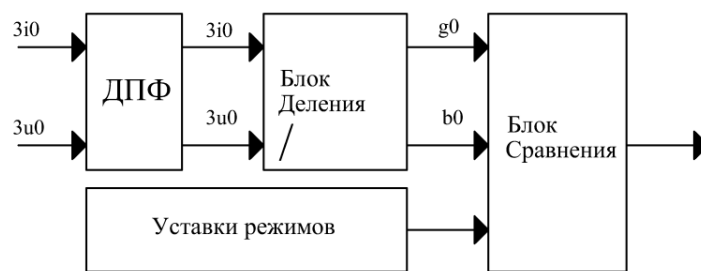


Рис. 6. Упрощенная структурно-функциональная схема пускового органа защиты на основе проводимостей

Fig. 6. The simplified structural and functional scheme of the starting element of protection based on conductivity

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

Результаты моделирования кабельной сети (рис. 4) при различных режимах и конфигурации для параметров активной и реактивной проводимостей приведены на рисунке 7.

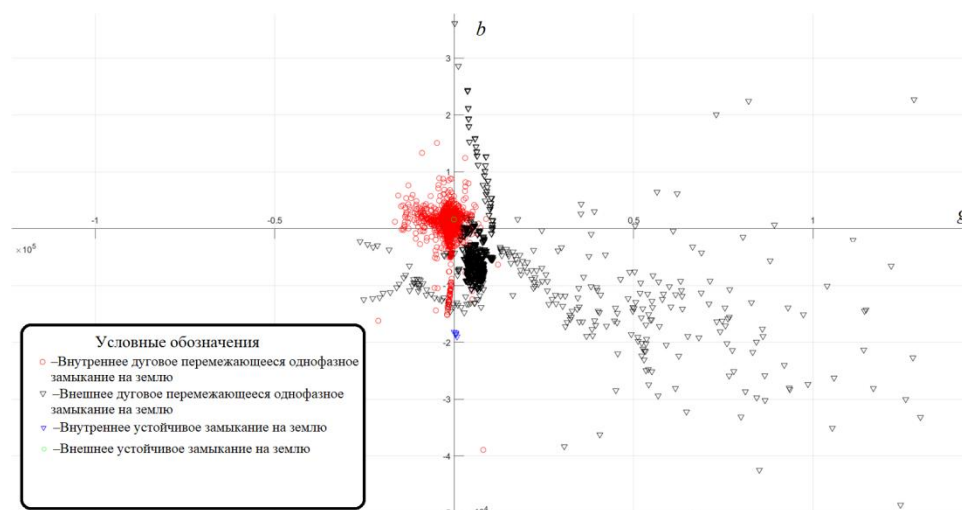


Рис. 7. График зависимости активных и реактивных проводимостей в различных режимах распределительной сети

Fig. 7. The dependency graph of active and reactive conductivities in different network modes

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

Для распознавания режимов по активной (p_0) и реактивной (q_0) мощностей нулевой последовательности использованы гармоники частотой от 50 Гц до 1,5 кГц. Выделялись квадратурные составляющие тока и напряжения. Мощности получены путём умножения комплекса тока на сопряженный комплекс напряжения. Упрощенная структурная схема пускового органа защиты представлена на рисунке 8. Здесь ДПФ – фильтр для выделения из тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$ суммы составляющих основной частоты 50 Гц и высших гармонических составляющих в диапазоне до 1,5 кГц.

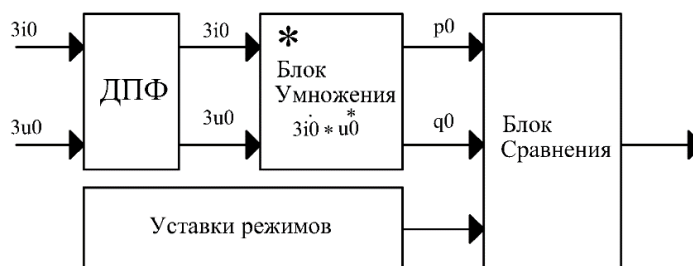


Рис. 8. Упрощенная структурно-функциональная схема пускового органа защиты на основе активной и реактивной мощностей

Fig. 8. The simplified structural and functional scheme of the starting element of protection based on electric power

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

Результаты моделирования кабельной сети (рис. 4) при различных режимах и конфигурации в параметрах активной и реактивной мощности приведены на рисунке 9.

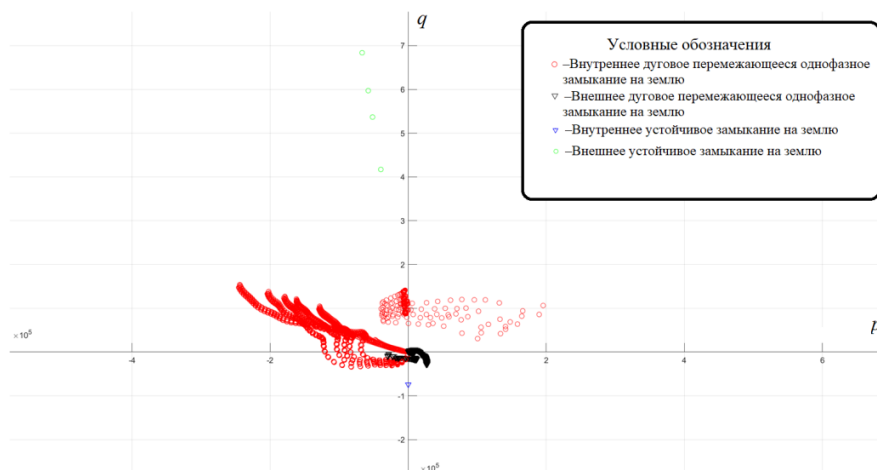


Рис. 9. График зависимости активных и реактивных мощностей в различных режимах распределительной сети

Fig. 9. The dependency graph of active and reactive electric powers in different network modes

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

Упрощенная структурная схема пускового органа защиты, обеспечивающей распознавание режимов сети (рис. 4) по току рабочей частоты и токам высших гармоник нулевой последовательности, представлена на рисунке 10. ДПФ фильтр используется для выделения из тока $3i_0$ компоненты промышленной частоты и суммы составляющих нечётных гармоник от третьей до тридцатой.



Рис. 10. Упрощенная структурно-функциональная схема пускового органа защиты на основе токов гармоник

Fig. 10. The simplified structural and functional scheme of the starting element of protection based on harmonics of currents

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

Результаты моделирования кабельной сети (рис. 4) при различных режимах и конфигурации в параметрах тока промышленной частоты и токам высших гармоник нулевой последовательности приведены на рисунке 11.

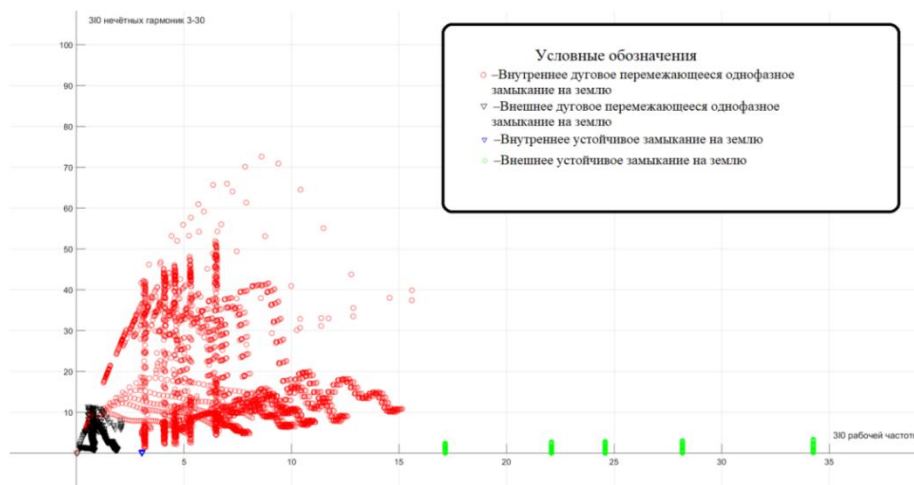


Рис. 11. График зависимости тока промышленной частоты от токов высших гармоник в различных режимах сети

Fig. 11. The dependency graph of operating frequency current from higher harmonic currents in different network modes

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

На рисунках 12 и 14 изображены аналогичные ранее приведенным упрощенные структурно-функциональные схемы пусковых органов защит соответственно на основе составляющих тока нулевой последовательности, а также на основе амплитудных значений токов и напряжений нулевой последовательности. Графики на рисунках 13 и 15 характеризуют области существования режимов кабельной сети 10 кВ (рис. 4) для различных видов ОЗЗ. Координаты, используемые на рисунках 13 и 15, соответствуют входным величинам (параметрам) защит (рис. 12 и 14).

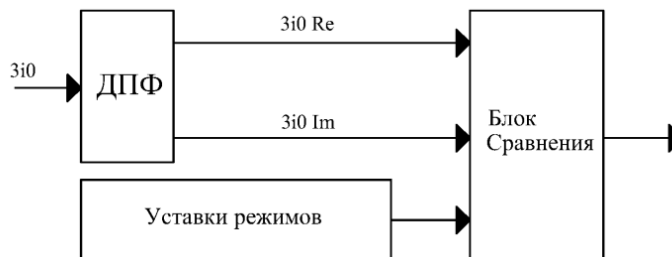


Рис. 12. Упрощенная структурно-функциональная схема пускового органа защиты на основе составляющих тока нулевой последовательности

Fig. 12. The simplified structural and functional scheme of the starting element of protection based on real and imaginary components of the current

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

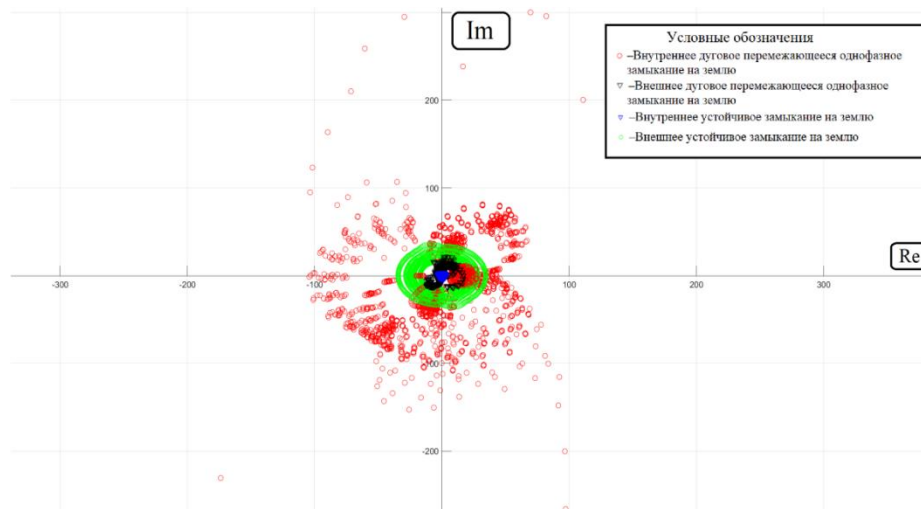


Рис. 13. График зависимости действительной и мнимой составляющей комплекса тока нулевой последовательности в различных режимах сети

Fig. 13. The dependency graph of real and imaginary components of the current in different network modes

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



Рис. 14. Структурно-функциональная схема пускового органа защиты на основе токов и напряжений нулевой последовательности

Fig. 14. The simplified structural and functional scheme of the starting element of protection based on currents and voltages

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

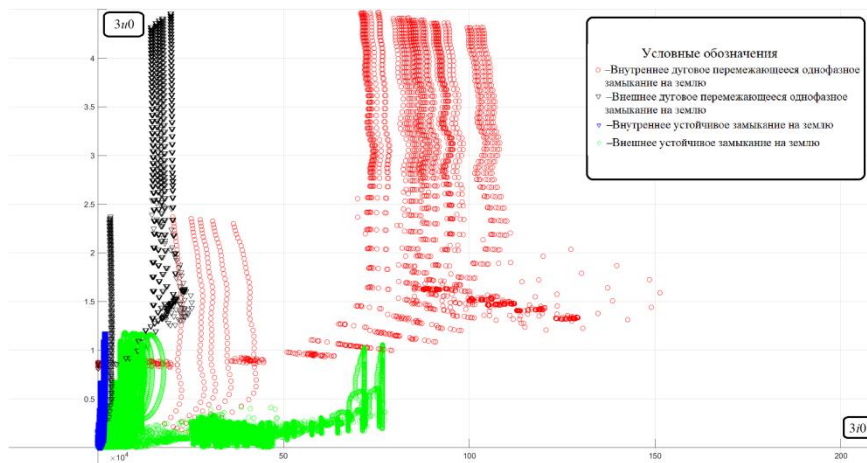


Рис. 15. График зависимости напряжения от тока нулевой последовательности в различных режимах сети

Fig. 15. The dependency graph of currents and voltages in different network modes

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

Обсуждение (Discussions)

Анализ рисунков 6-15 показал:

– моделирование электроэнергетической системы позволило получить обширную выборку данных о потенциальных состояниях, в которых она может находиться;

– не все исследуемые параметры токов и напряжений кабельной сети 10 кВ имеют физический смысл, но они сохраняют ценность для задачи классификации режимов ОЗЗ, так как группируются в различаемые области. При этом характер распределения зависимостей не оказывает существенного влияния на определение режима из-за учёта всех возможных состояний системы, в том числе и крайне редких. Области существования режимов ОЗЗ целесообразно задавать граничными значениями параметров токов и напряжений и использовать их в качестве параметров срабатывания (уставок) защиты;

– при использовании разных координатных параметров для рисунков 7, 9, 11, 13, 15 получено, что области существования режимов имеют различные размеры, удаленность друг от друга и зоны пересечения. Таким образом, применение различных параметров токов и напряжений при организации защиты от ОЗЗ обладает отличающейся информационной ценностью;

– пример (рис. 10) характеризует условия функционирования кабельной сети 10 кВ, при которых содержание высших гармоник в токах нулевой последовательности резко увеличивается в моменты дуговых замыканий на землю, что обеспечивает высокую информативность этого параметра в случае перемежающихся замыканий на землю, и уменьшается, имеет низкую информативность при устойчивых ОЗЗ;

– информационную ценность параметров для распознавания режимов можно определять различными способами. Например, целесообразно воспользоваться соотношением областей распознаваемых режимов. Если области удалены друг от друга, то для формирования уставочных границ необходимо учитывать расстояние между ними. Если между областями существуют зоны взаимного пересечения, то при нахождении параметров в этих зонах невозможно сделать однозначный вывод о существующем режиме. В таком случае решение на срабатывании защиты принимается, исходя из недопустимости отключения нормального режима, причем уставка должна соответствовать граничным значениям параметров между нормальным и аварийным режимом. В частности, оценка информативности исследуемых параметров может быть сформирована по отношению площадей области неопределённости к области нормальных режимов, то есть как процент их взаимного пересечения. При этом чем больше отношение площадей в процентном выражении, тем менее информативными являются параметры;

– сопоставление областей существования режимов кабельной сети на рисунках 7, 9, 11, 13, 15 свидетельствует о существовании их взаимных пересечений, в которых невозможно сделать однозначный вывод о характере присутствующего ОЗЗ. Оценка информативности параметров, выраженная отношением областей существования режимов, представлена в таблице 3.

Таблица 3
Table 3Оценка информативности параметров
Assessment of the informative value of indicators

Зависимость	$g_0; b_0$	$p_0; q_0$	$3i_0$ и сумма гармоник $3i_0$	$3i_0 \text{ Re};$ $3i_0 \text{ Im};$	$3i_0; 3u_0$
Взаимное пересечение, %	1,6	30	42	100	17

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

Следовательно, для организации многопараметрической защиты требуются различные способы объединения параметров токов и напряжений с использованием различных пусковых, а также измерительных органов;

– поскольку на размерность, ситуационное расположение и взаимное пересечение областей существования режимов кабельной сети оказывают влияние ошибки измерения параметров токов и напряжений, необходимы исследования и разработка алгоритмов ЦОС, обеспечивающих разделение областей существования режимов ОЗЗ с целью достижения селективности и высокой чувствительности защиты;

– при организации многопараметрической защиты от ОЗЗ целесообразно использование методов уменьшения признакового пространства (количества параметров токов и напряжений) без существенного снижения чувствительности с целью уменьшения требований в производительности вычислительных средств и стоимости защиты.

Заключение (Conclusions)

1. Для увеличения распознаваемости режимов защитами распределительных сетей 6–35 кВ в условиях различных ОЗЗ целесообразен переход к многопараметрическим защитами. Такие защиты используют большое число параметров токов и напряжений, а также позволяют однозначно классифицировать режимы ОЗЗ.

2. Анализ результатов имитационного моделирования кабельной сети 10 кВ показал, что различные параметры токов и напряжений обладают разной степенью информационной ценности для классификации режимов ОЗЗ. Поэтому при разработке многопараметрических защит необходима комбинация измерительных и пусковых органов для обеспечения лучшей распознаваемости режимов ОЗЗ.

3. Реализация многопараметрических защит от ОЗЗ перспективна в микропроцессорных устройствах релейной защиты распределительных электрических сетей и должна включать специальные алгоритмы цифровой обработки сигналов, обеспечивающие точность оценки величин токов и напряжений, а также организацию вычислений в реальном масштабе времени.

Литература

1. Федотов А.И., Ахметвалеева Л.В., Басыров Р.Ш., и др. Нормирование амплитуды высших гармоник при определении фидера с однофазным замыканием на землю // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. №1. С.58-68.
2. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Абдуллазянов А.Ф., и др. Цифровая система мониторинга повреждений на линиях электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021; Т.23. №1. С.146-155.
3. Achitaev A.A., Suslov K.V., Volkova I.O., et al. Development of an algorithm for identifying single-phase ground fault conditions in cable and overhead lines in the networks with isolated neutral // Energy Reports. 2023. Vol. 9. pp. 1079-1086.
4. Toader D., Solea C., Vesa D., et al. Analysis of the possibilities of selective detection of a single line-to-ground fault in a medium voltage network with isolated neutral // Energies. 2021. Vol. 14. N21. pp. 7019.
5. Kachesov V., Lebedev A., Kitova E. Monitoring in 6–35 kV power networks, location of single-phase ground fault and detection of fault feeder // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2023. Vol. 152. pp. 109271-109271.
6. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. 104 с.
7. Борухман, В.А. Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6–10 кВ и мероприятиях по их совершенствованию // Энергетик. 2000, № 1. С. 20–22.
8. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. М.: Высшая школа, 2006. 639 с.

9. Воробьева Е.А., Добрягина О.А., Шадрикова Т.Ю. Способ повышения эффективности функционирования адмитансной защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью // Вестник ИГЭУ. №4. С.58–68.
10. Шуин В.А. Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ // Электричество. 1991, № 10. С.58–61.
11. Шуин В.А., Кутумов Ю.Д., Кузьмина Н.В., и др. Моделирование кабельных линий напряжением 6–10 кВ при расчетах переходных процессов при замыканиях на землю // Вестник ИГЭУ. 2021. №5. С. 30–40.
12. Воробьева Е.А., Шуин В.А. Анализ достоверности эквивалентных моделей кабельных сетей 6–10 кВ для расчета переходных процессов при однофазных замыканиях на землю // Материалы международной научно-технической конференции: (XVIII Бенардосовские чтения); 27–29 мая 2015 г., Иваново. Иваново: ИГЭУ. С. 456–460.
13. Воробьева Е.А., Шуин В.А. Оценка точности эквивалентных моделей кабельных сетей 6–10 кВ для расчета переходных процессов при однофазных замыканиях на землю // Труды VI международной научно-технической конференции. Том 2. 09–13 ноября 2015 г., Иваново. Иваново: ИГЭУ. С. 63–66.
14. Maksimova M.N., Antonov V.I., Soldatov A.V., et al. Conversion of intermittent arc fault currents to information signals for phase-to-ground fault protection // Power Technology and Engineering. 2022. Vol. 56. N2. pp. 290–294.
15. Kuliński K., Heyduk A. Ground fault in medium-voltage power networks with an isolated neutral point: spectral and wavelet analysis of selected cases in an example industrial network modeled in the atp-emtp package // Energies. 2024. Vol. 17. N 7. pp. 1532.
16. Куликов А.Л., Мисриханов М.Ш. Введение в методы цифровой релейной защиты высоковольтных ЛЭП. Учеб. пособие. –М.: Энергоатомиздат, 2007. – 198 с.

Авторы публикации

Куликов Александр Леонидович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия. E-mail: inventor61@mail.ru

Старшов Иван Сергеевич – магистрант кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия. E-mail: ivanstarsh@yandex.ru

References

1. Fedotov A.I., Akhmetvaleeva L.V., Basyrov R.S., et al. Rating of amplitudes of high harmonics in determining feeder with single-phase ground fault. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):58–68. (In Russ.) doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-58-68
2. Fedotov A.I., Vagapov G.V., Abdullazyanov A.F., et al. Digital power lines faults monitoring system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(1):146–155. (In Russ.) https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155
3. Achitaev A.A., Suslov K.V., Volkova I.O., et al. Development of an algorithm for identifying single-phase ground fault conditions in cable and overhead lines in the networks with isolated neutral. *Energy Reports*. 2023;9:1079–1086. doi:10.1016/j.egyr.2023.01.046
4. Toader D., Solea C., Vesa D., et al. Analysis of the possibilities of selective detection of a single line-to-ground fault in a medium voltage network with isolated neutral. *Energies*. 2021;14(21):7019. doi:10.3390/en14217019
5. Kachesov V., Lebedev A., Kitova E. Monitoring in 6–35 kV power networks, location of single-phase ground fault and detection of fault feeder. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2023;152:109271–109271. doi:10.1016/j.ijepes.2023.109271
6. Shuin V.A., Gusenkov A.V. *Zashchity ot zamykanii na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV*. Moscow: NTF «Energoprogress», 2001. (In Russ).
7. Borukhman, V.A. Ob ekspluatatsii selektivnykh zashchit ot zamykanii na zemlyu v setyakh 6–10 kV i meropriyatiyakh po ikh sovershenstvovaniyu. *Energetik*. 2000; 1:20–22. (In Russ).
8. Andreev, V.A. *Releynaya zashchita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya*. Moscow: Vysshaya shkola, 2006. (In Russ).
9. Shuin V.A., Vorobyova E.A., Dobryagina O.A., et al. A way to increase the operating efficiency of admittance earth fault protection in 6–10 kV cable networks with isolated neutral. *Vestnik IGEU*. 2018;

4:20–22. (In Russ). doi: 10.17588/2072-2672.2018.4.020-030

10. Shuin V.A. Nachal'nye fazovye sootnosheniya elektricheskikh velichin perekhodnogo protsesssa pri zamykaniyakh na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV. *Elektrichestvo*. 1991;10:58–61.

11. Shuin V.A., Kutumov Yu.D., Kuzmina N.V., et al. Simulation study of 6–10 kV cable lines for transient processes calculation during earth faults. *Vestnik IGEU*. 2021; 5:30–40. doi: 10.17588/2072-2672.2021.5.030-040

12. Vorobyova E.A., Shuin V.A. Analiz dostovernosti ekvivalentnykh modelei kabel'nykh setei 6–10 kV dlya rascheta perekhodnykh protsessov pri odnofaznykh zamykaniyakh na zemlyu. In: *Mezhdunarodnyi nauchno-tehnicheskaya konferentsiya: (XVIII Benardosovskie chteniya)*; 27–29 May 2015; Ivanovo, Russia. Ivanovo Publ., 2015. pp.456–460. (In Russ).

13 Vorobyova E.A., Shuin V.A. Otsenka tochnosti ekvivalentnykh modelei kabel'nykh setei 6 - 10 kV dlya rascheta perekhodnykh protsessov pri odnofaznykh zamykaniyakh na zemlyu In: *VI mezhdunarodno nauchnaya-tehnicheskaya konferentsiya*. Tom 2; 09–13 Nov 2015; Ivanovo, Russia. Ivanovo Publ., 2015. pp.63–66. (In Russ).

14. Maksimova M.N., Antonov V.I., Soldatov A.V., et al. Conversion of intermittent arc fault currents to information signals for phase-to-ground fault protection. *Power Technology and Engineering*. 2022;56(2):290–294. doi: 10.1007/s10749-023-01508-w

15. Kuliński K., Heyduk A. Ground fault in medium-voltage power networks with an isolated neutral point: spectral and wavelet analysis of selected cases in an example industrial network modeled in the atp-empt package. *Energies*. 2024;17(7):1532. doi:10.3390/en17071532

16. Kulikov A.L., Misrikhanov M.Sh. *Vvedenie v metody tsifrovoi releinoi zashchity vysokovoltnykh LEP*. Moscow: NTF «Energoatomizdat», 2007. (In Russ).

Authors of the publication

Alexander L. Kulikov – Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU), Nizhny Novgorod, Russia. *E-mail: inventor61@mail.ru*

Ivan S. Starshov – Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU), Nizhny Novgorod, Russia. *E-mail: ivanstarsh@yandex.ru*

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено

20.01.2025 г.

Отредактировано

08.05.2025 г.

Принято

18.06.2025 г.



РАЗРАБОТКА СПОСОБА И АЛГОРИТМА ЗАЩИТЫ СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 0,4 кВ ОТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВА СЕКЦИОНИРОВАНИЯ

Виноградов А.В.^{1,2}, Лансберг А.А.¹

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия

²Орловский государственный аграрный университет, г. Орел, Россия
lansbergaa@vk.com

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Сельские электрические сети 0,4 кВ характеризуются низкой защищённостью от токов аварийных режимов, особенно удалённого однофазного короткого замыкания, имеющих значения, сопоставимые с токами нагрузки. Защитные аппараты в начале линии электропередачи не срабатывают на эти токи. Повышение защищённости линии электропередачи от указанных режимов можно обеспечить за счёт использования устройств сетевого секционирования, устанавливаемых в расщелку линии. В том числе это устройства для секционирования линий с отпайками – мультиконтактные коммутационные системы. Значения токов и напряжений в точке установки секционирующих устройств отличаются от токов и напряжений в начале линии в разных режимах. Также имеют особенности и значения токов и напряжений при аварийных режимах в отпайки и продолжении магистрали линии. Это позволяет создавать новые, более достоверные способы и алгоритмы защиты электрической сети 0,4 кВ от аварийных режимов, выявления участков, на которых они произошли. *ЦЕЛЬ.* Разработка способа защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ от коротких замыканий с использованием устройства секционирования и алгоритма его реализации. *МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.* В ходе разработки способа защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ от коротких замыканий и алгоритма его реализации использовались результаты компьютерного моделирования аварийных режимов работы сельской электрической сети 0,4 кВ. Полученные при моделировании зависимости легли в основу разработки способа. Способ позволяет выявлять вид короткого замыкания и участок линии, на котором оно произошло. При разработке алгоритма защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ от коротких замыканий использовались положения ГОСТ 19.701-90 «Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения». *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Разработан способ защиты линии электропередачи 0,4 кВ с отпайками от коротких замыканий, выявления вида короткого замыкания и участка линии, на котором оно произошло. Разработан алгоритм реализации указанного способа. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Полученные результаты будут использоваться при разработке технических средств секционирования сельских электрических сетей 0,4 кВ и обосновании уставок их срабатывания.

Ключевые слова: линия электропередачи 0,4 кВ; однофазное короткое замыкание; секционирование; вакуумный контактор; микроконтроллерный блок управления.

Для цитирования: Виноградов А.В., Лансберг А.А. Разработка способа и алгоритма защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ от коротких замыканий с использованием устройства секционирования // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 56-68. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-56-68.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR PROTECTING RURAL 0.4 kV ELECTRICAL NETWORKS FROM SHORT CIRCUITS USING A PARTITIONING DEVICE AND AN ALGORITHM FOR ITS IMPLEMENTATION

Vinogradov A.V.^{1,2}, Lansberg A.A.¹

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

²Orel State Agrarian University, Orel, Russia
lansbergaa@vk.com

Abstract: *RELEVANCE.* Rural 0.4 kV electrical networks are characterized by low protection against emergency currents, especially remote single-phase short circuits, which have values comparable to load currents. The protective devices at the beginning of the power line do not work on these currents. An increase in the protection of the power transmission line from these modes can be achieved through the use of network partitioning devices installed in the dissection of the line. These include devices for sectioning lines with desoldering – multi-contact switching systems. The values of currents and voltages at the point of installation of the sectioning devices differ from the currents and voltages at the beginning of the line in different modes. There are also special features and values of currents and voltages during emergency modes in the desoldering and continuation of the main line. This allows us to create new, more reliable methods and algorithms for protecting the 0.4 kV electrical network from emergency conditions and identifying the areas where they occurred. *THE PURPOSE.* Development of a method for protecting rural 0.4 kV electrical networks from short circuits using a partitioning device and an algorithm for its implementation. *RESEARCH METHODS.* During the development of a method for protecting rural 0.4 kV electrical networks from short circuits and an algorithm for its implementation, the results of computer modeling of emergency modes of operation of a rural 0.4 kV electrical network were used. The dependencies obtained during modeling formed the basis for the development of the method. The method allows you to identify the type of short circuit and the section of the line where it occurred. When developing an algorithm for protecting rural 0.4 kV electrical networks from short circuits, the provisions of GOST 19.701-90 "Schemes of algorithms, programs, data and systems were used. Conditional designations and rules of execution". *RESULTS.* A method has been developed to protect a 0.4 kV power transmission line with desoldering from short circuits, identify the type of short circuit and the section of the line where it occurred. An algorithm for implementing this method has been developed. *CONCLUSION.* The results obtained will be used in the development of technical means for sectioning rural electrical networks of 0.4 kV and substantiating their operating settings.

Keywords: power transmission line 0.4 kV; single-phase short circuit; sectioning; vacuum contactor; microcontroller control unit.

For citation: Vinogradov A.V., Lansberg A.A. Development of a method for protecting rural 0.4 kV electrical networks from short circuits using a partitioning device and an algorithm for its implementation. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (4): 56-68. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-56-68.

Введение (Introduction)

В электрических сетях 0,4 кВ, выполненных в воздушном исполнении, проблема низкой защищённости от токов удалённых коротких замыканий остаётся актуальной. Это обусловлено рядом особенностей таких сетей, являющихся, преимущественно, сельскими. Чаще всего они подключены к трансформаторам низкой мощности. Трансформаторы номинальных мощностей 63 кВА, 100 кВА, 160 кВА, 250 кВА в совокупности составляют более 70% от общего парка трансформаторов в электросетевых компаниях [1]. При этом средняя протяжённость сельских электрических сетей 0,4 кВ до наиболее удалённой точки в регионах Центрального и Приволжского Федеральных округов РФ варьируется от 747 до 985 метров [2], что значительно превышает рекомендуемые Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) и технической политикой ПАО «Россети» 500 метров. В свою очередь, наиболее часто используемыми проводами в сельских электрических сетях 0,4 кВ являются неизолированные типа А-25 и А-35, которые в совокупности составляют более 50% от общей протяжённости электрических сетей 0,4 кВ в регионах [3]. Перечисленные технические особенности сельских электрических сетей 0,4 кВ приводят к высоким значениям сопротивления петли «фаза-ноль» и, соответственно, к низким значениям тока однофазного короткого замыкания. Таким образом, ток данного аварийного режима может быть сопоставим с током нагрузки или номинальным током защитного коммутационного аппарата, что не позволяет последнему произвести отключение за указанное в пункте 1.7.79 ПУЭ время.

Режим однофазного короткого замыкания является наиболее распространённым повреждением в сельских электрических сетях 0,4 кВ и может возникнуть при схлестывании проводов. Например, в электрических сетях 0,4 кВ филиала ПАО «Россети Центр»–«Орёлэнерго» схлестывание проводов, вызванное падением веток и деревьев, ветровыми нагрузками, стало причиной 14% аварийных отключений за 2018-2023 годы [4].

При этом в сельских электрических сетях 0,4 кВ, эксплуатируемых польской электросетевой компанией EPS, среди 10458 аварийных отключений за 10 лет 23,08% вызваны схлестыванием проводов [5].

В работах [6, 7] отмечено, что используемые в настоящее защитные коммутационные аппараты (плавкие предохранители и автоматические выключатели), установленные на вводе линии электропередачи 0,4 кВ, обеспечивают защиту только первых 250-300 метров при возникновении однофазного короткого замыкания. Это связано с высокой кратностью их срабатывания по отношению к номинальному току защитного коммутационного аппарата [8]. Одним из эффективных решений повышения защищённости сельских электрических сетей 0,4 кВ от однофазных коротких замыканий является использование автоматических выключателей с микропроцессорным и электронным расцепителями. В отличие от устаревших автоматических выключателей с электромагнитными расцепителями, характеризующимися высокой кратностью срабатывания расцепителя к номинальному току, например, 3 раза и более, – для микропроцессорных и электронных расцепителей данная кратность составляет 1,5 раза. Они также обеспечивают возможность регулировки номинального тока расцепителя в диапазоне 0,4-1 номинального тока автоматического выключателя [9].

Челябинскими учёными Южно-Уральского государственного университета Ершовым А.М., Валеевым Р.Г. и Сидоровым А.И. усовершенствована концепция построения защиты сельских электрических сетей напряжением 0,4 кВ, которая заключается в секционировании по длине воздушной линии плавкими предохранителями [10, 11]. Предложенная концепция была проиллюстрирована на примере защиты воздушной линии электропередачи 0,4 кВ протяжённостью 500 метров, выполненной с использованием провода сечением 35 мм², питание которой осуществляется от трансформатора номинальной мощностью 160 кВА со схемой и группой соединения обмоток Y/Y_n-0 [12]. Отмечено, что секционирование воздушных линий электропередачи 0,4 кВ позволяет повысить электробезопасность их эксплуатации в 50 и более раз [13].

Наиболее совершенным техническим решением является использование автоматизированных устройств секционирования, таких как пункты секционирования, в том числе с функцией АВР, мультиконтактные коммутационные системы. Так, разработанный Виноградовой А.В., Виноградовым А.В., Псарёвым А.И. секционирующий пункт для сельских электрических сетей 0,4 кВ, был внедрён в эксплуатацию в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» в 2016 году и после доработан с учётом возможностей диспетчерского управления. В качестве коммутационного аппарата, обеспечивающего включение и отключение электрической сети, в секционирующем пункте используется вакуумный контактор. Управление вакуумным контактором производится микроконтроллерным блоком управления, который также осуществляет измерение параметров электрической сети 0,4 кВ. Разработаны технические решения по установке и креплению секционирующего пункта на опорах сельской электрической сети 0,4 кВ [14]; произведено технико-экономическое обоснование его использования на примере линии электропередачи 0,4 кВ, обеспечивающей электроснабжение производственных сельскохозяйственных потребителей [15].

В рамках концепции использования высокоавтоматизированных устройств секционирования в июне 2023 года в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» было внедрено устройство сетевого секционирования – мультиконтактная коммутационная система с двумя контактными группами и тремя выводами (МКС-2-3В), предназначенное для секционирования линий с отпайками. Внешний вид разработанного устройства в ходе опытно-промышленной эксплуатации в ноябре 2023 года представлен на рисунке 1.

Устройство разработано в рамках гранта от Фонда содействия инновациям по договору №17749ГУ/2022 от 13 мая 2022 года и является аналогом реклоузера для электрических сетей 0,4 кВ. На разработанное устройство получен патент РФ №2802722.

Устройство МКС-2-3В содержит 2 низковольтных вакуумных контактора для секционирования магистрального участка и отпайки, так как 90% сельских электрических сетей 0,4 кВ имеют одну отпайку в одной рассматриваемой точке линии [3]. Управление контакторами осуществляется микроконтроллерным блоком, который также с использованием датчиков тока и напряжения обеспечивает мониторинг фазных напряжений, фазных токов и токов в нейтральных проводах в точке его установки. Данные электрические параметры в совокупности с положением вакуумных контакторов передаются в центр управления сетями с использованием SCADA-системы ОИК «СИСТЕЛ». Это позволяет диспетчеру электросетевой компании непрерывно получать данные о состоянии электрической сети и обеспечивать, при необходимости, управление

её конфигурацией за счёт включения, или отключения контакторов устройства. Одной из основных задач устройства МКС-2-3В является защита сети от удалённых однофазных коротких замыканий в отпайке и на участке магистрали за устройством, отключение и локализация повреждённого участка.



Рис. 1. Устройство секционирования линий электропередачи 0,4 кВ типа МКС-2-3В в ходе опытно-промышленной эксплуатации

Fig. 1. Device for sectioning 0.4 kV power transmission lines of the MKS-2-3V type during pilot operation

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

Описанный выше функционал МКС-2-3В и понимание соотношений параметров режимов работы сети в точке установки данного устройства позволяют разработать новый способ и алгоритм защиты участков линий электропередачи 0,4 кВ от аварийных режимов, в том числе удалённых однофазных коротких замыканий, выявления вида аварийного режима и участка его возникновения.

Цель исследования заключается в разработке способа защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ от коротких замыканий с использованием устройства секционирования и алгоритма его реализации.

Материалы и методы (Materials and methods)

Ранее была создана компьютерная модель и выполнен ряд работ по моделированию аварийных режимов работы электрической сети 0,4 кВ. Внешний вид компьютерной модели в программном комплексе MATLAB Simulink представлен на рисунке 2.

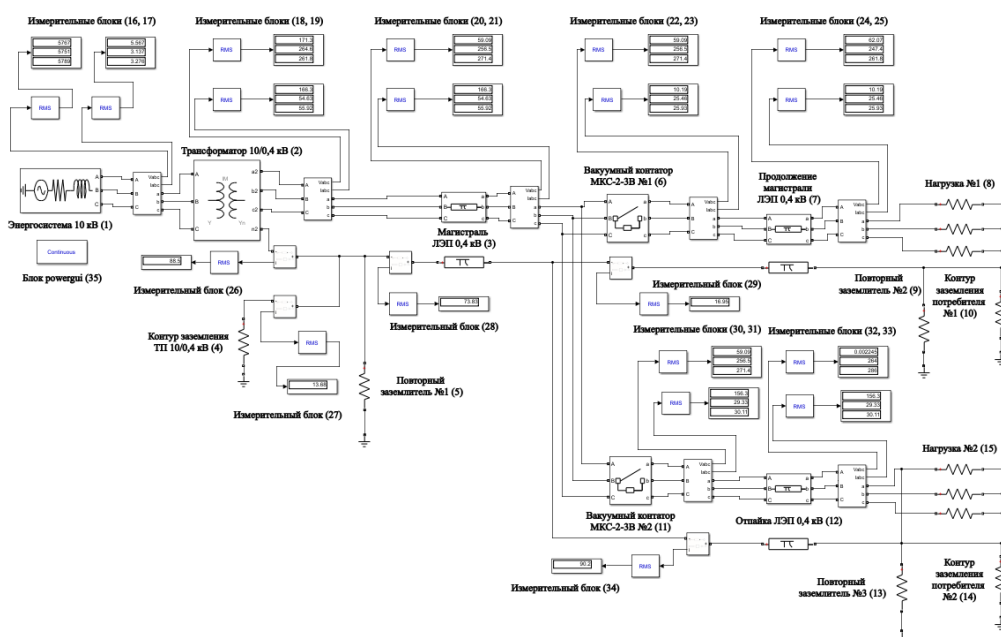


Рис. 2. Компьютерная модель электрической сети 0,4 кВ с устройством секционирования линий электропередачи

Fig. 2. A computer model of a 0.4 kV electrical network with a power line partitioning device

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

Компьютерная модель, представленная на рисунке 2, содержит: энергосистему 10 кВ (1), силовой трансформатор 10/0,4 кВ (2), общий магистральный участок ЛЭП 0,4 кВ (3), продолжение магистрального участка ЛЭП 0,4 кВ (7), отпайку от ЛЭП 0,4 кВ (12), контур заземления ТП 10/0,4 кВ (4), повторные заземлители совмещённого PEN-провода (5, 9, 13), нагрузки (8, 15), контуры заземления потребителей (10, 14), вакуумные контакторы устройства секционирования МКС-2-3В (6, 11), блоки измерения фазных токов и фазных напряжений (16-25, 30-33), блоки измерения тока в совмещённом PEN-проводнике (26, 27, 28, 29, 34), блок powergui (35).

В ходе имитационного моделирования нагрузочных и аварийных режимов работы в исследуемой электрической сети 0,4 кВ с устройством секционирования МКС-2-3В фиксировались токи в нейтральном проводе, протекающие на различных участках. Моделирование было реализовано для нагрузок суммарной мощностью 28,2 кВт. При этом была учтена возможная несимметрия нагрузки путём изменения их сопротивлений, что позволило добиться коэффициентов несимметрии по нулевой последовательности в точке их подключения со значениями 1,6%, 3,2%, 4,9% и 7,0%. При этом токи в нейтральном проводе фиксировались в пяти точках электрической сети 0,4 кВ: на вводе низкого напряжения 0,4 кВ трансформатора – $I(N)_{т}$; в заземляющем устройстве трансформатора – $I(N)_{з.т}$; в общем участке магистрали линии электропередачи 0,4 кВ – $I(N)_{м1}$; на продолжении магистрали в точке установки вакуумного контактора №1 устройства секционирования типа МКС-2-3В – $I(N)_{м2}$; на отпайке в точке установки вакуумного контактора №2 устройства МКС-2-3В – $I(N)_{о}$. Результаты моделирования токов в нейтрали в различных режимах работы электрической сети 0,4 кВ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Токи нейтрали электрической сети 0,4 кВ в разных режимах
Neutral currents of the 0.4 kV electrical network in different modes

Коэффициент несимметрии, $K_{0\%}$, %	Ток нейтрали в нагрузочных режимах, А					Ток нейтрали в режимах однофазного КЗ, А				
	$I(N)_{т}$	$I(N)_{з.т}$	$I(N)_{м1}$	$I(N)_{м2}$	$I(N)_{о}$	$I(N)_{т}$	$I(N)_{з.т}$	$I(N)_{м1}$	$I(N)_{м2}$	$I(N)_{о}$
1,6	2,415	0,2102	2,19	1,095	1,095	88,5	13,68	73,83	16,95	90,2
3,2	4,871	0,4239	4,416	2,208	2,208	89,47	13,77	74,72	16,01	89,99
4,9	7,4	0,6438	6,708	3,354	3,354	90,39	13,85	75,56	15,07	89,72
7,0	10,85	0,944	9,832	4,916	4,916	91,96	14	76,99	13,81	89,5

*Источник: Получено по результатам компьютерного моделирования Source: Obtained from computer simulation results.

В ходе компьютерного моделирования с учётом результатов, представленных в таблице 1, было выявлено, что в аварийном режиме однофазного короткого замыкания ток в нейтральном проводе в точке подключения отпайки, в которой моделируется короткое замыкание, возрастает в 18,2-82,4 раза в зависимости от степени несимметрии нагрузок. Данный подход к контролю токов в нейтральном проводе позволит с высокой степенью достоверности определить возникновение аварийного режима и участок электрической сети 0,4 кВ, на котором произошло замыкание.

Также были определены зависимости отношения напряжений на неповреждённой фазе к повреждённым фазам при различных видах несимметричных коротких замыканий в электрической сети 0,4 кВ и разной удалённости точки измерения от начала линии. Исследование было реализовано без учёта влияния нагрузки, так как при её использовании соотношение напряжений увеличивается.

Распределение фазных напряжений в электрической сети 0,4 кВ в режиме однофазного короткого замыкания на примере радиальной линии протяжённостью 1023 метра, выполненной с использованием неизолированного провода А-35, подключенной к трансформатору ТМ-250/10/0,4 У/Ун-0 представлено на рисунке 3 [16]. Было выявлено, что при однофазных коротких замыканиях в электрической сети 0,4 кВ независимо от места возникновения аварийного режима от ввода низкого напряжения трансформатора 0,4 кВ данные зависимости сохраняются. Соотношение между фазными напряжениями неповреждённых фаз к фазному напряжению повреждённой фазы остается неизменным. Так, при удалённости до 25% от вывода низкого напряжения трансформатора до точки повреждения отношение составляет не более, чем 1,5 раза; при удалённости 25-50%

фазные напряжения неповрежденных фаз превышают напряжение поврежденной фазы в 1,6-2,4 раза, при удаленности 50-75% отношение составляет от 2,6 до 5 раз. В свою очередь, при удаленности от 75% и более отношение напряжений превышает значение 5 и более раз и при приближении к точке замыкания больше на порядки, т.е. десятки и сотни раз (теоретически до бесконечности). При этом в точке короткого замыкания напряжение поврежденной фазы принимает потенциал земли и составляет 0 В, а напряжения неповрежденных фаз возрастают в $\sqrt{2}$ раз [16].

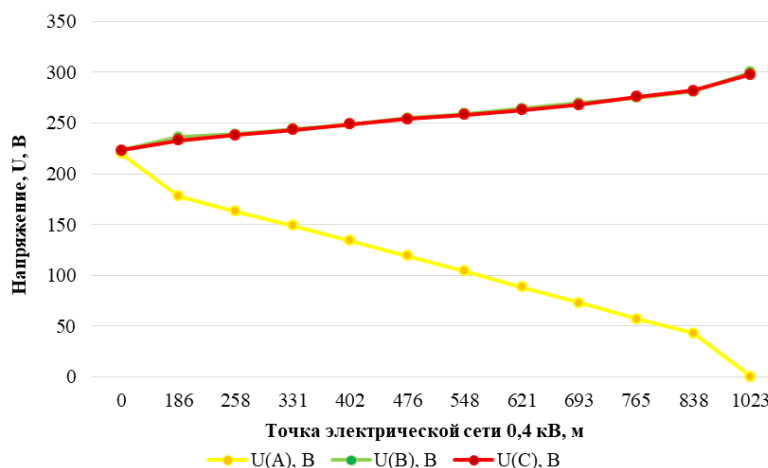


Рис. 3. Распределение напряжений при реализации опыта однофазного короткого замыкания в электрической сети 0,4 кВ

*Источник: Получено авторами в ходе исследования [16] Source: Obtained by the authors in the course of the study [16]

Аналогичные исследования были реализованы как для двухфазного короткого замыкания, так и для двухфазного короткого замыкания на нулевой проводник. Выявленные соотношения фазных напряжений представлены в таблице 2 [16, 17].

Таблица 2

Table 2

Соотношение фазных напряжений сельской электрической сети 0,4 кВ в аварийных режимах, вызванных несимметричными короткими замыканиями

The ratio of phase voltages of the rural electrical network is 0.4 kV in emergency modes caused by asymmetric short circuits

Вид аварийного режима	Процент от общей протяженности сельской электрической сети 0,4 кВ, %			
	0-25	25-50	50-75	75-100
Однофазное короткое замыкание, $I_{по(1)}$, А	$\leq 1,5$	1,5-2,6	2,6-5	≥ 5
Двухфазное короткое замыкание, $I_{по(2)}$, А	$\leq 1,27$	1,27-1,58	1,58-1,85	$\geq 1,85$
Двухфазное короткое замыкание на нулевой провод, $I_{по(2-N)}$, А	$\leq 1,52$	1,52-2,6	2,6-5,2	$\geq 5,2$

*Источник: Получено по результатам компьютерного моделирования [16, 17] Source: Obtained from computer simulation results [16, 17].

Значения отношения напряжений, представленные в таблице 2, характерны при любом значении тока аварийного режима. Это позволяет, при знании точки установки устройства секционирования в электрической сети 0,4 кВ, задать наименьшую уставку по соотношению напряжений, которое будет характерно при коротких замыканиях разных видов в наиболее удаленной точке сети. В свою очередь, при симметричном трёхфазном коротком замыкании в наиболее удаленной точке сети необходимо определить минимальную уставку по напряжению, которая будет характерна в точке установки устройства при протекании тока аварийного режима. При этом ток в нейтральном проводе увеличивается только в режимах однофазного короткого замыкания и двухфазного короткого замыкания на нулевой провод, а его значение в данных режимах

на порядок больше токов в нейтральном проводе, протекающих даже при значительной несимметрии фазных нагрузок. Это позволяет реализовать защиту электрической сети 0,4 кВ с использованием устройства секционирования, в которое будут заданы уставки по совокупности признаков, таких как соотношения напряжений по фазам, значения токов в нулевом проводнике в каждой из отпайки и магистрали, значение токов в фазных проводниках, характерных для каждого из аварийных режимов.

Часть соотношений, представленных в таблице 2, подтверждается результатами исследования режима однофазного короткого замыкания учёными Южно-Уральского государственного университета на компьютерной модели сельской электрической сети 0,4 кВ [18], на физической модели [19], а также на опытном полигоне с линией электропередачи 0,4 кВ на базе филиала ПАО «Россети Урал»-«Челябэнерго» [20].

Алгоритм реализации способа защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ от коротких замыканий с использованием устройства секционирования типа МКС-2-3В разработан в соответствии с ГОСТ 19.701-90 «Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения».

Результаты (Results)

В ходе исследования был разработан способ защиты линии электропередачи с отпайками от коротких замыканий, выявления вида короткого замыкания и участка линии, на котором оно произошло. На разработанный способ подан патент на изобретение в ФИПС по заявке №2025101160 от 22.01.2025 года. Структурная электрическая схема предлагаемого способа представлена на рисунке 4.

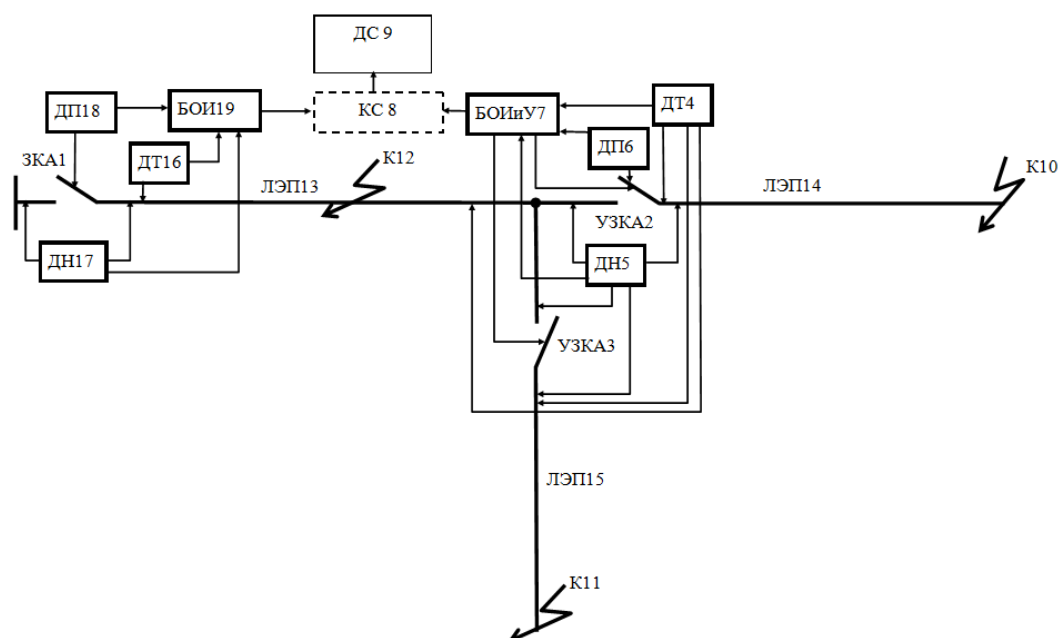


Рис. 4. Структурная электрическая схема способа защиты линии электропередачи 0,4 кВ с отпайками от коротких замыканий, выявления вида короткого замыкания и участка линии, на котором оно произошло

Fig. 4. Structural electrical diagram of a method for protecting a 0.4 kV power transmission line with desoldering from short circuits, identifying the type of short circuit and the section of the line where it occurred

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

Представленная на рисунке 4 схема содержит: защитный коммутационный аппарат ЗКА1; управляемый защитный коммутационный аппарат УЗКА2, управляемый защитный коммутационный аппарат УЗКА3; датчик тока ДТ4; датчик напряжения ДН5; датчик положения ДП6; блок обработки информации и управления БОИиУ7; канал связи КС 8; диспетчер сети ДС9; точка короткого замыкания К10; точка короткого замыкания К11; точка короткого замыкания К12; начальный участок линии электропередачи ЛЭП13; первая отпайка ЛЭП14; вторая отпайка ЛЭП15; датчик тока ДТ16; датчик напряжения ДН17; датчик положения ДП18; блок обработки информации БОИ19.

Предлагаемый способ защиты линии электропередачи 0,4 кВ с отпайками от удалённых коротких замыканий и выявления вида короткого замыкания и участка линии, на котором оно произошло, заключается в установке управляемых защитных коммутационных аппаратов в точке отпайки от линии электропередачи 0,4 кВ с учётом селективности их

работы с установленным в начале линии защитным коммутационным аппаратом. Способ обеспечивает возможность защиты линии электропередачи 0,4 кВ с отпайками от коротких замыканий разных видов, в том числе возникающих в начале линии и удалённых симметричного и несимметричных коротких замыканий.

Согласно разработанному способу, управляемые защитные коммутационные аппараты оснащают датчиками тока, напряжения, положения, блоком обработки информации и управления и встроенным в него средством связи. С помощью данных средств контролируют ток в каждой фазе и нулевом проводнике, протекающие в магистрали линии и отпайке, фазные напряжения с обеих сторон от каждого установленного управляемого защитного коммутационного аппарата, положение каждого управляемого защитного коммутационного аппарата.

Выявление однофазного короткого замыкания реализуется следующим образом. Происходит фиксация повышения, по сравнению с заданной уставкой, тока в одной из фаз магистрали или отпайки и одновременно с этим повышение тока в нулевом проводнике. Затем выявляют понижение фазного напряжения той же фазы ниже установленной уставки, в которой зафиксирован повышенный ток, и повышение напряжения в двух других фазах. Исходя из этого, делают вывод о том, что в фазе на контролируемом участке сети, произошло однофазное короткое замыкание. Происходит отключение управляемого защитного коммутационного аппарата, установленного в устройстве секционирования, фиксируют изменение его положения и исчезновение напряжения после него. После этого делают вывод об успешном отключении аварийного режима и информируют диспетчера о факте однофазного короткого замыкания на данном участке с указанием повреждённой фазы, а также успешном его отключении. В алгоритме также предусмотрена реализация функции АПВ защитного коммутационного аппарата, отключившего повреждённый участок.

При возникновении других аварийных режимов, вызванных несимметричными короткими замыканиями, способ реализуется аналогичным образом с учётом характерных соотношений параметров. Опишем отличительные особенности электрических параметров, характерных для других режимов. В случае двухфазного короткого замыкания происходит выявление повышенного напряжения на одной из фаз и пониженного - на двух других фазах; при этом в двух фазах протекает повышенный ток. При двухфазном коротком замыкании на нулевой провод электрические параметры схожи с параметрами режима двухфазного короткого замыкания, но отличительной особенностью является дополнительно увеличение тока в нулевом проводе. Особенности трёхфазного короткого замыкания является значительное повышение тока в трёх фазах с одновременным падением фазных напряжений.

Устройство контролирует ток в отпайке и магистрали, что позволяет выявить участок, на котором возник аварийный режим.

Обсуждение (Discussions)

Предложенный выше способ осуществляется в соответствии с разработанными алгоритмами, который закладываются в микроконтроллерный блок управления устройством секционирования МКС-2-3В. На рисунке 5 показан пример алгоритма реализации способа при аварийном режиме однофазного короткого замыкания фазы «А» на нулевой проводник на участке магистрали, подключенной к устройству секционирования типа МКС-2-3В.

Алгоритм содержит: блоки «терминатор» (1, 18); блок «данные» (2); блоки «предопределённый процесс» (3, 5, 6, 8, 11, 12, 13, 14, 16, 17); блоки «решение» (4, 7, 15); блоки «соединитель» (9, 10).

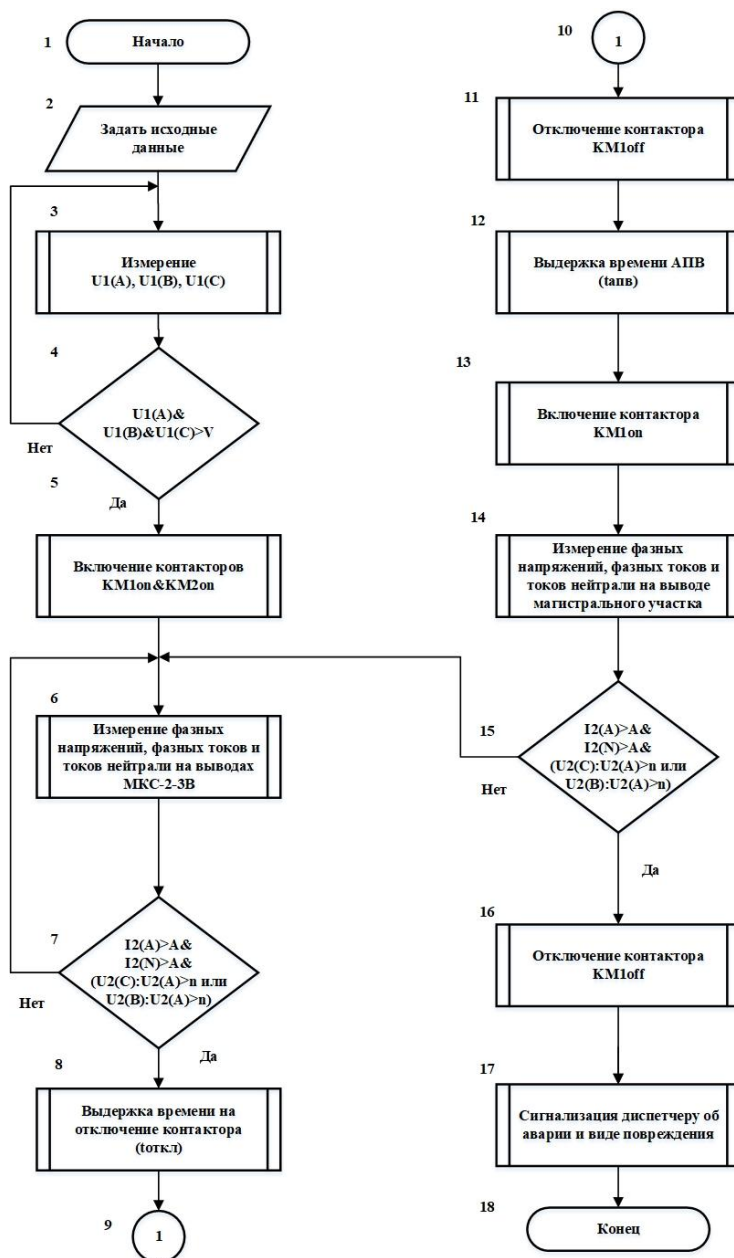


Рис. 5. Алгоритм реализации способа защиты линии электропередачи 0,4 кВ с отпайками от удалённых коротких замыканий и выявления вида короткого замыкания и участка линии, на котором оно произошло

Fig. 5. Algorithm for implementing a method for protecting a 0.4 kV power transmission line with desoldering from remote short circuits and identifying the type of short circuit and the section of the line where it occurred

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

Запуск алгоритма осуществляется из ограничителя «Начало» (блок 1). Затем вводятся исходные данные (блок 2). К ним относятся: фазные напряжения на вводе устройства секционирования MKC-2-3B – $U1(A)$, $U1(B)$, $U1(C)$; фазные напряжения на выводе магистрали – $U2(A)$, $U2(B)$, $U2(C)$; фазные токи и ток нейтрали на выводе магистрали – $I2(A)$, $I2(B)$, $I2(C)$, $I2(N)$; фазные напряжения на выводе отпайки – $U3(A)$, $U3(B)$, $U3(C)$; фазные токи и ток нейтрали на выводе магистрали – $I3(A)$, $I3(B)$, $I3(C)$, $I3(N)$; команды на включение и отключение вакуумных контакторов устройства секционирования типа MKC-2-3B, обеспечивающих защиты магистрали и отпайки – $KM1on$, $KM2on$, $KM1off$, $KM2off$; выдержка времени на отключение вакуумного контактора при аварии – $t_{откл}$; выдержка времени на реализацию автоматического повторного включения вакуумных контакторов – $t_{АПВ}$; значение фазных напряжений на вводе устройства секционирования MKC-2-3B – V ; значение фазных токов и токов нейтрали на выводах устройства – A ; соотношение фазных напряжений на выводах устройства – n (зависят от места возникновения короткого замыкания и места установки устройства – таблица 2).

После задания исходных данных осуществляется измерение фазных напряжений $U1(A)$, $U1(B)$, $U1(C)$ на вводе устройства секционирования типа МКС-2-3В (блок 3). Затем осуществляется сравнение фазных напряжений $U1(A)$, $U1(B)$, $U1(C)$ на вводе устройства секционирования типа МКС-2-3В с минимально допустимым значением напряжения V (блок 4), при котором осуществляется включение вакуумных контакторов устройства. Если фазные напряжения $U1(A)$, $U1(B)$, $U1(C)$ ниже заданной уставки, осуществляется повторный процесс их измерения (блок 3) и последующего сравнения. Если они превышают заданную уставку, то микроконтроллерный блок управления устройством секционирования МКС-2-3В посылает сигналы на включение вакуумных контакторов (блок 5), к которым подключены отпайка и продолжение магистрали линии электропередачи 0,4 кВ.

Затем осуществляется измерение электрических параметров на выводах устройства (блок 6), к которым подключены защищаемые участки: фазных токов $I2(A)$, $I2(B)$, $I2(C)$, $I2(N)$, фазных напряжений $U2(A)$, $U2(B)$, $U2(C)$ и тока нейтрали $I2(N)$ на продолжении магистрали, а также фазных токов $I3(A)$, $I3(B)$, $I3(C)$, $I3(N)$, фазных напряжений $U3(A)$, $U3(B)$, $U3(C)$ и тока нейтрали $I3(N)$ на отпайке.

Продemonстрируем алгоритм выявления однофазного короткого замыкания фазы «А» на продолжении магистрали, подключенной к устройству секционирования. В блок 7 задаётся условие: $I2(A) > A \& I2(N) > A \& (U2(B)/U2(A) > n$ или $U2(C)/U2(A) > n$). В случае возникновения однофазного КЗ на фазе «В» условие будет иметь вид: $I2(B) > A \& I2(N) > A \& (U2(A)/U2(B) > n$ или $U2(C)/U2(B) > n$). А при повреждении фазы «С»: $I2(C) > A \& I2(N) > A \& (U2(C)/U2(B) > n$ или $U2(C)/U2(A) > n$). Аналогичные соотношения характерны в случае возникновения однофазных коротких замыканий на отпайке.

При этом значение коэффициента n , как ранее было отмечено, зависит от места установки устройства секционирования в электрической сети 0,4 кВ и регламентируется данными, полученными в ходе моделирования, представленными в таблице 2.

Если условие не соблюдается, производится повторный процесс измерения электрических параметров (блок 6). В случае превышения уставок контролируемые электрическими параметрами производится выдержка времени (блок 7) на отключение вакуумного контактора $t_{откл}$ с целью отстройки от кратковременных ненормальных режимов и возможного срабатывания защитного коммутационного аппарата при повреждении на электрооборудовании потребителя. В ходе опытно-промышленной эксплуатации данное значение было принято равным 5 секунд. После выдержки времени производится процесс отключения вакуумного контактора (KM1off), к которому подключен участок продолжения магистрали линии электропередачи (Блок 11). Затем происходит отсчёт времени на автоматическое повторное включение (Блок 12). Реализация АПВ позволит восстановить электроснабжение потребителей в случае не устойчивого повреждения. После выдержки времени происходит повторное включение вакуумного контактора (KM1on), который осуществляет защиту продолжения магистрального участка электрической сети 0,4 кВ (Блок 13). После повторного включения вакуумного контактора (KM1on) осуществляется измерение электрических параметров в точке его установки (Блок 14).

Блок 15 осуществляет проверку схожую с той, которая реализуется в блоке 7. В случае повреждения других фаз и возникновения других видов симметричных и несимметричных коротких замыканий условия будут подобны тем, которые были сформулированы при описании блока 7. При неустойчивом повреждении и не превышении контролируемыми параметрами заданных уставок производится повторное измерение электрических параметров на выводах устройства (блок 6). В случае устойчивого повреждения и превышения заданных уставок производится повторный процесс отключения вакуумного контактора (KM1off) (блок 16). Затем осуществляется отправка сигнала диспетчеру о возникновении аварийного отключения и виде повреждения (блок 17).

Рассмотрим соотношения электрических параметров, характерных для других видов несимметричных коротких замыканий, которые используются в блоках 7 и 15. При возникновении двухфазного короткого замыкания на магистрали соотношения будут иметь вид:

- при замыкании фаз BC: $I2(B) > A \& I2(C) > A \& (U2(A)/U2(B) > n$ или $U2(A)/U2(C) > n$);
- при замыкании фаз AC: $I2(A) > A \& I2(C) > A \& (U2(B)/U2(A) > n$ или $U2(B)/U2(C) > n$);
- при замыкании фаз AB: $I2(A) > A \& I2(B) > A \& (U2(C)/U2(A) > n$ или $U2(C)/U2(B) > n$).

В случаях возникновения двухфазных коротких замыканий на нулевой провод на магистрали соотношения примут вид:

- при замыкании фаз BC на нулевой провод: $I2(B) > A \& I2(C) > A \& I2(N) > A \& (U2(A)/U2(B) > n$ или $U2(A)/U2(C) > n$);

– при замыкании фаз АС на нулевой провод:
 $I_2(A) > A \& I_2(C) > A \& I_2(N) > A \& (U_2(B)/U_2(A) > n \text{ или } U_2(B)/U_2(C) > n)$;

– при замыкании фаз АВ на нулевой провод:
 $I_2(A) > A \& I_2(B) > A \& I_2(N) > A \& (U_2(C)/U_2(A) > n \text{ или } U_2(C)/U_2(A) > n)$.

При возникновении трёхфазного короткого замыкания на продолжении магистрали, подключенной к устройству секционирования, соотношение будет иметь вид:
 $I_2(A) > A \& I_2(B) > A \& I_2(C) > A \& U_2(A) < V \& U_2(B) < V \& U_2(C) < V$.

В случае возникновения коротких замыканий на отпайке соотношения будут иметь аналогичный вид с учётом индекса отпайки.

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет реализовывать способ защиты линии электропередачи 0,4 кВ с отпайкой от коротких замыканий, выявлять вид короткого замыкания и участок линии, на котором оно произошло.

Заключение (Conclusions)

В результате проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

1) Применение средств секционирования в линиях 0,4 кВ, в том числе в линиях с отпайками, требует создания достоверных способов выявления видов аварийных режимов и участков сети, на которых они возникают. Такие способы могут быть созданы на основе знания соотношений токов и напряжений в фазных и нулевых проводах в точке установки устройства секционирования, характерных для выявляемых режимов.

2) Разработанный способ защиты линии электропередачи 0,4 кВ с отпайками от коротких замыканий за счёт использования устройства сетевого секционирования типа МКС-2-3В обеспечивает возможность достоверного выявления вида короткого замыкания за счёт использования в качестве признаков не только значения тока, но и изменения соотношений напряжения по фазам. Также способ позволяет определить участок линии, на котором произошло короткое замыкание и повреждённую фазу. Также способ позволяет информировать диспетчера сети о результатах работы коммутационных аппаратов, установленных для защиты, что повышает наблюдаемость электрической сети 0,4 кВ и её управляемость, сокращает время перерывов в электроснабжении потребителей.

3) Алгоритм реализации предложенного способа учитывает характерные для разных аварийных режимов соотношения электрических параметров, что позволяет выявить не только вид аварийного режима, но и участок, на котором он возник, а также повреждённые фазы.

Литература

1. Лансберг А.А., Виноградов А.В., Виноградова А.В. Структура парка силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ на примере электросетевой организации филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», обслуживающей сельские электрические сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, №5. С. 34-45. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-34-45. EDN: TEJQYG.
2. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Сорокин Н.С. Характеристика электросетевых компаний по количеству и протяженности линий электропередачи, мощности подстанций // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69. № 2 (47). С. 31-41. DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-2-31-41. EDN: AJQSZN.
3. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Виноградова А.В. Анализ конфигурации электрических сетей 0,4 кВ Орловской области // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70, №4(53). С. 22-29. DOI 10.22314/2658-4859-2023-70-4-22-29. EDN: LHIRSK.
4. Виноградова А.В. Причины отключений в сельских электрических сетях и их структурирование // Агротехника и энергообеспечение. 2024. №4(45). С. 12-19. EDN: FYMIMZ.
5. Łukasz GRAKOWSKI, Andrzej Ł. CHOJNACKI, Katarzyna GĘBCZYK, Kornelia BANASIK. Statistical Analysis and Modeling of the Reliability of Overhead Low Voltage Lines. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, R. 95 NR 12/2019. pp. 261-264. doi:10.15199/48.2019.12.59.
6. Ершов А.М., Валеев Р.Г. Методы и средства защиты воздушных линий напряжением 380 В от однофазных коротких замыканий // Электробезопасность. 2016. №4. С. 33-46. EDN: YOQRNM.
7. Ершов А.М., Валеев Г.С., Валеев Р.Г. Режимы работы электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 7-8. С. 55-63. EDN: HXHWNL.
8. Ershov A.M., Valeev G.S., Valeev R.G. Protection of overhead lines with voltage of 380 v from the single-phase short circuits // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016. Proceedings, Chelyabinsk, 2016. P. 7911457. DOI 10.1109/ICIEAM.2016.7911457. EDN: XNFJLQ.

9. Капустинский А.Ю., Константинова С.В. Повышение чувствительности защит в электрических сетях до 1 кВ путем применения микропроцессорных и полупроводниковых расцепителей // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 5. С. 393-407. DOI 10.21122/1029-7448-2021-64-5-393-407. EDN: AIJIAW.
10. Ершов А.М., Сидоров А.И., Валеев Р.Г. Защита воздушных линий напряжением 380 В от однофазных коротких замыканий с помощью секционирующих предохранителей // Промышленная энергетика. 2016. №11. С. 17-22. EDN: XELAQZ.
11. Валеев Р.Г., Тропин С.А., Ерунова А.В., Ермолаева Н.А. Методика расстановки секционирующих плавких предохранителей в сетях до 1000 В // Электробезопасность. 2014. №4. С. 3-16. EDN: UZNAVF.
12. Валеев Р.Г. Концепция построения защиты электрических сетей напряжением 380 В от однофазных коротких замыканий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2013. Т. 13, №1. С. 30-34. EDN: QBUGVZ.
13. Валеев Р.Г. Повышение уровня электробезопасности путем секционирования воздушных линий 0,4 кВ // Электробезопасность. 2014. №2. С. 34-36. EDN: UZNART.
14. Псарев А.И., Виноградова А.В. Пункт секционирования с функцией АВР для электрических сетей 0,4 кВ: схемы и варианты установки // Агротехника и энергообеспечение. 2024. №3(44). С. 33-42. EDN: LHCUAC
15. Псарев А.И., Виноградова А.В. Техничко-экономическое обоснование применения секционирующих пунктов в сельских электрических сетях 0,4 кВ // Агротехника и энергообеспечение. 2024. №3(44). С. 65-74. EDN: QJADJW.
16. Лансберг А.А., Виноградов А.В., Панфилов А.А. Оценка достоверности математической модели сельской электрической сети 0,4 кВ в Matlab Simulink на примере исследования установившегося режима однофазного короткого замыкания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25, №6. С. 14-28. DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-14-28. EDN: WCTFZT.
17. Лансберг А.А., Букреев А.В. Компьютерное моделирование режимов несимметричных коротких замыканий в сельской электрической сети 0,4 кВ // Вестник НГИЭИ. 2025. №1(164). С. 45-57. DOI 10.24412/2227-9407-2025-1-45-57. EDN: NENRPD.
18. Валеев Р.Г., Млоток А.В., Ершов А.М., Сидоров А.И. Моделирование электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями в программной среде MATLAB-Simulink // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. № 9-10. С. 116-128. EDN: RUHUEV.
19. Ершов А.М., Валеев Р.Г., Сидоров А.И., Млоток А.В. Разработка физической модели электрической сети напряжением 380 В // Электробезопасность. 2014. №1. С. 3-18. EDN: UZNANN.
20. Млоток А.В., Ершов А.М., Валеев Р.Г., Сидоров А.И. Опытная электрическая сеть напряжением 380 В // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2014. №2(19). С. 96-107. EDN: SNZESB.

Авторы публикации

Виноградов Александр Владимирович – д-р техн. наук, доцент, гл. науч. сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия.

Лансберг Александр Александрович – мл. науч. сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия. lansbergaa@vk.com

References

1. Lansberg A.A., Vinogradov A.V., Vinogradova A.V. The structure of the park of power transformers with a higher voltage of 6-10 kV on the example of the electric grid organization of the branch of PJSC «Rosseti Center»-«Orelenergo», serving rural electric networks // News of higher educational institutions. Energy problems. 2021. Vol. 23, №5. pp. 34-45. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-34-45. EDN: TEJQYG.
2. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Sorokin N.S. Characteristics of electric grid companies by the number and length of power transmission lines, substation capacity // Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex. 2022. Vol. 69. №2(47). pp. 31-41. DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-2-31-41. EDN: AJQSZN.
3. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Vinogradova A.V. Analysis of the configuration of 0.4 kV electrical grids of the Orel region // Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex. 2023. Vol. 70, №4(53). pp. 22-29. DOI 10.22314/2658-4859-2023-70-4-22-29. EDN: THIRSK.
4. Vinogradova A.V. Reasons for outages in rural electric networks and their structuring // Agrotechnics and energy supply. 2024. №4(45). pp. 12-19. EDN: FYMIMZ.

5. Łukasz GRAKOWSKI, Andrzej Ł. CHOJNACKI, Katarzyna GĘBCZYK, Kornelia BANASIK. Statistical Analysis and Modeling of the Reliability of Overhead Low Voltage Lines. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, R. 95 NR 12/2019. pp. 261-264. doi:10.15199/48.2019.12.59.
6. Ershov A.M., Valeev R.G. Methods and means of protecting overhead lines with 380 V voltage from single-phase short circuits // Electrical safety. 2016. №4. pp. 33-46. EDN: YOQRNM.
7. Ershov A.M., Valeev G.S., Valeev R.G. Modes of operation of an electric network with a voltage of 380 V with overhead lines // News of higher educational institutions. Energy problems. 2016. №7-8. pp. 55-63. EDN: XHXWNL.
8. Ershov A.M., Valeev G.S., Valeev R.G. Protection of overhead lines with voltage of 380 v from the single-phase short circuits // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016. Proceedings, Chelyabinsk, 2016. P. 7911457. DOI 10.1109/ICIEAM.2016.7911457. EDN: XNFJLQ.
9. Kapustinski A.Yu., Kanstantsinava S.V. Increasing the Sensitivity of Protections in Electrical Networks up to 1 kV by Using Microprocessor and Semiconductor Release Tripping Devices. Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. 2021;64(5):393-407. DOI 10.21122/1029-7448-2021-64-5-393-407. EDN: AIJAW.
10. Ershov A.M., Sidorov A.I., Valeev R.G. Protection of overhead lines with 380 V voltage from single-phase short circuits using sectioning fuses // Industrial Power Engineering. 2016. №11. pp. 17-22. EDN: XELAQZ.
11. Valeev R.G., Tropin S.A., Yerunova A.V., Yermolayeva N.A. Placement technique of sectionalizing fuses in networks up to 1000 V // Electrical safety. 2014. №4. pp. 3-16. EDN: UZNAVF.
12. Valeev R.G. The concept of building protection of electric networks 380 V signal-phase shortcircuit// Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy. 2013. Vol. 13, №1. pp. 30-34. EDN: QBUGVZ.
13. Valeev R.G. Improving an electrical safety by partitioning overhead lines of 0,4 kV // Electrical safety. 2014. №2. pp. 34-36. EDN: UZNAT.
14. Psarev A., Vinogradova A. Sectioning point with ats function for 0.4 kV electric networks: schemes and installation options// Agrotechnics and energy supply. 2024. №3(44). pp. 33-42. EDN: LHCUAC
15. Psarev A.I., Vinogradova A.V. Feasibility study of using sectionalizing points in rural electric networks of 0.4 kV // Agrotechnics and energy supply. 2024. №3(44). pp. 65-74. EDN: QJADJW.
16. Lansberg A.A., Vinogradov A.V., Panfilov A.A. Assessment of the reliability of the mathematical model of the 0.4 kV rural electric network in Matlab Simulink on the example of a study of the steady-state mode of a single-phase short circuit. Power engineering: research, equipment, technology. 2023;25(6):14-28. DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-14-28. EDN: WCTFZT.
17. Landsberg A. A., Bukreev A. V. Computer simulation of the modes of asymmetric short circuits in a rural 0.4 kV electrical network // Bulletin NGIEI. 2025. №1(164). P. 45–57. DOI: 10.24412/2227-9407-2025-1-45-57. EDN: NENRPD.
18. Valeev R.G., Mlotok A.V., Ershov A.M., Sidorov A.I. Modeling the power supply voltage 380 with overhead lines in the software environment MATLAB-Simulink // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems. 2013. №9-10. PP. 116-128. EDN: RUHUEV.
19. Yershov A.M., Valeev R.G., Sidorov A.I., Mlotok A.V. The development of a physical model of the electrical network voltage of 380 V // Electrical safety. 2014. №1. pp. 3-18. EDN: UZNANN.
20. Mlotok A.V., Ershov A.M., Valeev R.G., Sidorov A.I. An experimental 380 V electrical network // Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. 2014. №2(19). pp. 96-107. EDN: SNZESB.

Authors of the publication

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

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

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено 20.03.2025 г.

Отредактировано 30.06.2025 г.

Принято 03.07.2025 г.



УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ДЕРЕВА СОБЫТИЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Левин В.М.¹, Зеленских А.А.¹, Петушков П.А.²

¹Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

²АО «РЭМиС», г. Новосибирск, Россия

levin@power.nstu.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Повышение эффективности поддержки принятия решений по безаварийной эксплуатации ответственного электрооборудования требует совершенствования методов и алгоритмов обнаружения неисправностей, что, несомненно, является актуальной задачей. *ЦЕЛЬ.* Разработать эффективную и надёжную процедуру для целостного анализа, оценки и прогнозирования возможных неисправностей в маслонаполненном трансформаторном оборудовании, как в одном из критически важных активов энергопредприятия. *МЕТОДЫ.* При решении задач применяется метод анализа растворенных в масле газов (АРГ) как наиболее информативный с точки зрения оперативной оценки технического состояния трансформатора и обнаружения признаков его отклонений от нормы, а также усовершенствованный метод построения и анализа дерева событий (ДС), который сочетает традиционную структуру причинно-следственных связей с компонентами расчета индекса технического состояния оборудования. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Усовершенствование метода анализа дерева событий касается введения количественной меры важности причинно-следственных связей на каждом из иерархических уровней с определением вероятностей исходов каждого из инициирующих событий по заданной вероятности корневого события. Роль количественной меры выполняет система весовых коэффициентов, полученных с применением матриц парных сравнений Саати для каждого из уровней ДС. Сформирована логико-вероятностная модель ДС, позволяющая не только фиксировать взаимосвязи между событиями и последовательность их возникновения, но также ранжировать их по степени влияния на конечный нежелательный исход. Выполнены расчеты, подтверждающие эффективность предложенного подхода. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Получена логико-вероятностная модель ДС, обеспечивающая наряду с АРГ целостный анализ, оценку и прогнозирование возможных неисправностей маслонаполненного трансформаторного оборудования. Разработана эффективная процедура построения и анализа ДС с применением экспертных оценок и компонентов расчета индекса технического состояния оборудования. Продемонстрирована возможность эффективного применения разработанной модели на примере анализа причин монотонного превышения граничных концентраций оксида и диоксида углерода, растворенных в масле исследуемых трансформаторов.

Ключевые слова: трансформатор; неисправность; анализ дерева событий; важность причинно-следственных связей; логико-вероятностная модель; поддержка принятия решений; ранжирование событий.

Для цитирования: Левин В.М., Зеленских А.А., Петушков П.А. Усовершенствованный метод анализа дерева событий для обнаружения неисправностей в силовых трансформаторах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 69-81. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-69-81.

AN ADVANCED EVENT TREE ANALYSIS METHOD FOR DETECTING FAULTS IN POWER TRANSFORMERS

Levin V.M.¹, Zelenskih A.A.¹, Petushkov P.A.²

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

²JSC "REMiS", Novosibirsk, Russia

levin@power.nstu.ru

Abstract: RELEVANCE is improving the efficiency of decision support for the trouble-free operation of responsible electrical equipment requires improved methods and algorithms for fault detection, which is undoubtedly an urgent task. THE PURPOSE is to develop an effective and reliable procedure for the holistic analysis, assessment and prediction of possible malfunctions in oil-filled transformer equipment, as one of the critical assets of an energy company. METHODS. When solving problems, the dissolved gas analysis (DGA) method is used as the most informative in terms of the technical condition operational assessment of the transformer and detection of signs of its deviations from the norm, as well as an improved method for constructing and event tree analysis (ETA), which combines the traditional structure of cause-and-effect relationships with components for calculating the equipment health index. RESULTS. The improvement of the event tree analysis method concerns the introduction of a quantitative measure of the importance of cause-effect relationships at each of the hierarchical levels, with the determination of the probabilities of outcomes of each of the initiating events based on a given root event probability. The role of a quantitative measure is performed by a weighting coefficient system obtained using the matrices of paired comparisons of Saati for each ETA level. A logical and probabilistic ETA model has been formed, which allows not only to record the interrelationships between events and the sequence of their occurrence, but also to rank them according to the degree of influence on the final undesirable outcome. Calculations confirming the proposed approach effectiveness have been performed. CONCLUSION. A logical-probabilistic ETA model has been obtained, which provides, along with the DGA method, a holistic analysis, assessment and prediction of possible malfunctions of oil-filled transformer equipment. An effective procedure has been developed for constructing and analyzing data sets using expert assessments and components for calculating the equipment health index. The possibility of effective application of the developed model is demonstrated by analyzing the causes of monotonous excess of the boundary concentrations of carbon monoxide and carbon dioxide dissolved in the oil of the studied transformers.

Keywords: transformer; malfunction; event tree analysis; importance of cause-and-effect relationships; logical-probabilistic model; decision support; event ranking.

For citation: Levin V.M., Zelenskih A.A., Petushkov P.A. An advanced event tree analysis method for detecting faults in power transformers. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (4): 69-81. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-69-81.

Введение (Introduction)

Одной из главных задач технической диагностики ответственного оборудования электростанций и электрических сетей является оперативная оценка и прогнозирование опасных неисправностей, способных привести к отказу работоспособности и другим нежелательным последствиям¹. Своевременное обнаружение факта и причин возможных неисправностей в электрооборудовании возлагается на системы поддержки принятия решений по его эксплуатации (СППР). СППР призваны обнаружить первичные признаки развивающихся неисправностей (дефектов), оценить степень риска дальнейшей эксплуатации объекта, выявить наиболее вероятные причины возникновения и предложить адекватные меры по их устранению (эксплуатационные воздействия). Внедрение подобных систем в эксплуатацию сложного, дорогостоящего и массового оборудования электростанций и электрических сетей, коим является высоковольтное маслонаполненное трансформаторное оборудование (МНТО) весьма актуально, а их разработка связана с решением сложной наукоёмкой технической задачи [1, 2]. Сложность задачи требует расширенного комплексного представления объекта с указанием не только признаков неисправности, как конечного нежелательного события, но и последовательности предшествующих её появлению промежуточных событий, обозначением их взаимосвязей и оценкой вероятностей возникновения. Для этих целей достаточно продуктивны методы анализа деревьев событий/отказов (ДС/ДО), имеющих отношение к теории анализа и управления рисками [3, 4].

Многочисленные исследования с применением классического метода синтеза и анализа ДС (ДО) связаны с представлениями о степени детализации описания системы при изучении её различных свойств. Так, например, ДС (ДО) широко применяется в исследовании надежности и безопасности структурно-сложных систем [5]. Предложения авторов главным образом направлены на расширение возможностей описательного

¹ ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 1989. – 21 с.

моделирования структурно-сложных систем применением логико-вероятностных моделей ДС для выбора и обоснования структур сложных технических систем на основе сравнительного анализа надежности исследуемых вариантов. В [6] предлагается расширить описание ДС физико-механическими процессами и детализировать алгоритм его синтеза и анализа. Отмечается, что классический метод синтеза и анализа ДС может работать как в структурном проявлении, с точки зрения логических схем взаимодействия элементов системы, так и в проявлении физическом, отражающем причинно-следственные связи деградиационных процессов, приводящих к конечному нежелательному результату. Это, безусловно, требует различной степени детализации описания системы и формализации экспертных знаний, которые не подлежат регламентации, а определяются исключительно спецификой решаемой задачи. Следует отметить, что синтез ДС представляет собой интеллектуальную процедуру и базируется на глубоких экспертных знаниях в предметной области. Процедура построения ДС начинается с определения «корневого» события – вершины ДС. После этого определяются все промежуточные события и их различные комбинации, которые приводят к «корневому» событию. Затем каждое из этих событий рассматривается как вершина ДС. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнут требуемый по условию задачи уровень детализации и получены все исходные («инициирующие») события. Процедура анализа ДС выполняется в обратном порядке от каждого из «инициирующих» событий к «корневому». При этом цель анализа состоит в выявлении самой короткой цепочки ДС, либо, при наличии количественной оценки вероятностей событий, цепочки с максимальной суммарной вероятностью. Одно из направлений совершенствования классического метода синтеза и анализа ДС (ДО) – это автоматизация означенных процедур с применением программируемых модулей и баз знаний [7]. В статье [8] авторы отмечают, что алгоритмы принятия решений, как правило, обладают древовидной структурой и состоит из ветвей и узлов, подобно классическому методу ДС. Это гарантирует высокую точность классификации дефектов по правилам, аналогичным правилам структурного анализа ДС.

Потребности учета дополнительных факторов и степени их неопределенностей при расширении описания системы и процессов, инициализирующих события, с учетом специфики решаемых задач неоднократно приводили к попыткам усовершенствования базового метода синтеза и анализа ДС (ДО). Одна из подобных попыток касается расширения описания системы с применением причинно-следственных связей, учитывающих механизм и кинетику изменения состояний опасного производственного объекта [9]. Применение ДС (ДО) для задач идентификации неисправностей, оценки технического состояния и планирования профилактического обслуживания МНТО освещено в работе [10]. Здесь логико-вероятностная модель ДС устанавливает все причинно-следственные связи между первичными признаками идентифицируемой в трансформаторе неисправности и последовательностью событий, запускающих физические процессы деградации. Это позволяет расширить диагностическую модель объекта описанием событий, в той или иной степени иницирующих появление и развитие опасной неисправности, что очень важно с точки зрения выбора и введения эксплуатационных воздействий по её предотвращению или устранению. Другая известная идея усовершенствования метода синтеза и анализа ДС состоит во включении в расчет компонентов структуры индекса технического состояния оборудования и раскрыта в [11, 12] и [13, 14]. Несмотря на значительный вклад описанных исследований с применением методов построения и анализа ДС (ДО) такое научное направление, как диагностика неисправностей МНТО, определение причин и прогнозирование риска последствий отказа остаётся недостаточно изученным. Основное препятствие к этому кроется в ограниченных возможностях классического метода в формализации описания деградиационных процессов МНТО и сравнительной оценки альтернатив развития событий.

Для повышения интеллектуальных возможностей метода синтеза и анализа ДС, а также эффективности его практического применения в задачах диагностики неисправностей МНТО актуально расширение базового метода в направлении определения количественной меры значимости причинно-следственных связей на каждом из иерархических уровней ДС для ранжирования их по важности влияния на появление «корневого» события.

Целью исследования является усовершенствование базового метода анализа ДС за счет расширенного описания МНТО комбинацией двух типов моделей: модели оперативной идентификации неисправности (дефекта) на основе АРГ и ситуационной логико-вероятностной модели причинно-следственных связей с ранжированием их по важности и определением наиболее вероятной причины опасной неисправности. Научная значимость исследования состоит в дополнении логико-вероятностной модели ДС расчетом

количественной меры важности цепочек событий для выявления наиболее вероятного сценария развития неисправности. Практическая значимость исследования заключается в разработке регулярной вычислительной процедуры формализации специализированных экспертных знаний и ранжирования причинно-следственных связей ДС по важности их влияния на корневое событие. Это позволит усилить интеллектуальные возможности СППР по эксплуатации МНТО анализом наиболее вероятных причин и последствий неисправности и рекомендовать адекватные меры по их устранению.

Материалы и методы (Materials and methods)

Ранжирование МНТО по сроку службы, техническому состоянию, приоритетности вывода в ремонт, либо другим критериям широко применяется в задачах диагностирования и управления техническим обслуживанием и ремонтами (ТОиР) [15]. Оно позволяет осуществлять группировку оборудования по степени значимости в соответствии с выбранным целевым критерием. Одним из практических приложений подобного подхода является определение индекса технического состояния (ИТС) линий электропередачи и единиц основного электрооборудования (ЕО) станций и сетей². Методика расчета ИТС оборудования включает ряд компонентов: определение фактических значений параметров технического состояния функциональных узлов (ФУ) по данным диагностического контроля (мониторинга); балльная оценка групп параметров состояния ФУ; вычисление весовых коэффициентов ФУ и ЕО, каждый из которых характеризует важность элемента с точки зрения влияния на систему в целом, а их сумма на каждом из уровней равна 1; расчет итоговых значений ИТС ФУ и ЕО. Именно процедура определения весовых коэффициентов для каждой из рассматриваемых альтернатив необходима для усовершенствования метода синтеза и анализа ДС в комбинированной модели принятия решений по обнаружению и устранению неисправностей МНТО. Её реализация возможна с помощью одного из методов экспертных оценок, например метода Саати на основе формирования матрицы парных сравнений (МПС) [16]. Рассмотрим решение задачи на обобщенном числовом примере.

Пусть имеется некоторое ДС, отражающее ситуационное описание последовательности взаимосвязанных событий в эксплуатации трансформатора (рис. 1). Корневым событием служит исчезновение тока во вторичной обмотке. Для построения ДС применяются логические операторы, которые связывают входные и выходные события по принципу их подчиненности. Так, например, логический оператор «ИЛИ» с одним выходом и несколькими входами отражает обязательное появление выходного события при наличии любого из входных. На схеме ДС (рис. 1) логические операторы «ИЛИ» 1, 2, 3, 4 формируют двухуровневую иерархическую модель, объединяющую корневое, промежуточные и исходные события, которые с точки зрения принятия решений представляют собой известные альтернативы.

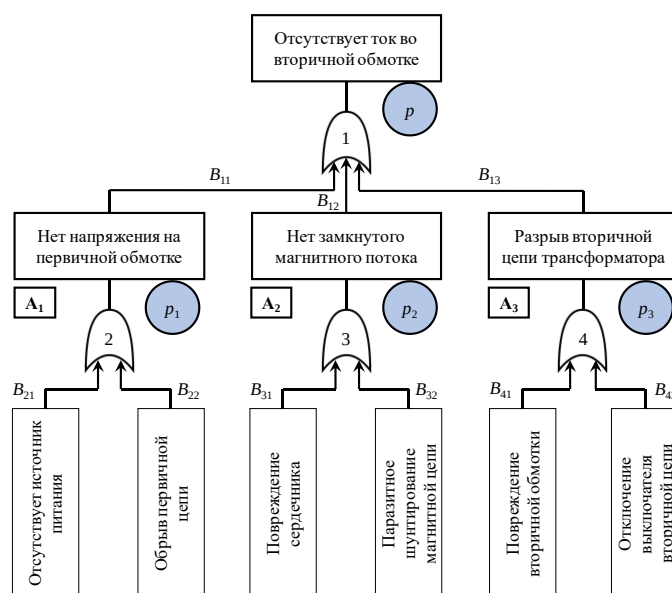


Рис. 1. Пример использования ДС

Fig. 1. An example of using the ET

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

² Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей. Утверждена приказом Минэнерго России от 26.07.2017, № 676. Доступно по: <https://tk-expert.ru/uploads/files/ntd/ntd-679-20200531-233201.pdf>. Ссылка активна на 05.01.2025.

Например, корневое событие – отсутствие тока во вторичной обмотке трансформатора может произойти по одной из альтернативных причин: A_1 – исчезновение напряжения на первичной обмотке; A_2 – отсутствие в сердечнике замкнутого магнитного потока; A_3 – разрыв вторичной цепи трансформатора. Формирование МПС и проверка полученных экспертных оценок на непротиворечивость производится по следующему алгоритму.

1. Для каждого логического оператора на каждом иерархическом уровне ДС формируется квадратная МПС, размерность которой (n) определяется количеством рассматриваемых альтернатив. Так, например, для верхнего иерархического уровня ДС (рис. 1) при $n = 3$ формируется МПС размерностью (3×3) . На пересечении i -й строки и j -го столбца МПС с помощью чисел натурального ряда 1 – 9 проставляются экспертные оценки A_{ij} , характеризующие степени предпочтения i -й альтернативы по отношению к j -й. При примерно равноценном предпочтении i -й и j -й альтернатив $A_{ij} = 1$. Если степень предпочтения i -й альтернативы незначительно выше, чем j -й, $A_{ij} = 3$. Если i -я альтернатива предпочтительнее j -й, $A_{ij} = 5$. При значительном или явном предпочтении i -й альтернативы по сравнению с j -й оценки A_{ij} будут соответственно равны 7 или 9. В случае меньшего предпочтения i -й альтернативы по сравнению с j -й в МПС указываются обратные (дробные) оценки $(1/3, 1/5, 1/7, 1/9)$. Главную диагональ матрицы, таким образом, составляют единицы.

2. Определяются цены альтернатив как средние геометрические значения соответствующих строк МПС:

$$\Pi_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n A_{ij}}. \quad (1)$$

3. Определяется сумма цен альтернатив матрицы ($i = 1, \dots, n$):

$$\Pi = \sum_{i=1}^n \Pi_i. \quad (2)$$

4. Вычисляются весовые коэффициенты (веса, B_i) альтернатив (при этом сумма B_i в каждой строке МПС равна 1):

$$B_i = \frac{\Pi_i}{\Pi}. \quad (3)$$

Наиболее предпочтительной является альтернатива, имеющая максимальный вес.

5. Для проверки экспертных оценок на противоречивость находятся суммы j -х столбцов МПС:

$$C_j = \sum_{i=1}^n A_{ij}. \quad (4)$$

6. Рассчитывается вспомогательный коэффициент β суммированием произведений сумм столбцов МПС на веса альтернатив:

$$\beta = \sum_{j=1}^n (C_j \cdot B_j). \quad (5)$$

7. Определяется индекс согласованности экспертных оценок:

$$CI = \frac{\beta - n}{n - 1}. \quad (6)$$

8. Определяется значение случайной согласованности $(RC)^3$, зависящее от размерности МПС (количества альтернатив). Так согласно справочным данным, при $n = 3$, $RC = 0,58$.

9. Находится отношение согласованности оценок

$$CR = \frac{CI}{RC}, \quad (7)$$

для которого условие $CR \leq 0,2$ означает отсутствие необходимости корректировки МПС (экспертные оценки непротиворечивы)³.

Система весовых коэффициентов для альтернатив на каждом из иерархических уровней ДС (B_i) характеризует их важность (приоритетность) с точки зрения корневого события. При известной вероятности корневого события p_i весовые коэффициенты B_j позволяют определить вероятности промежуточных событий A_j по выражению:

³ Системный анализ и исследование операций: лаб. практикум для студ. спец. «Автоматизированные системы обработки информации» дневн. и дистанц. форм обуч. / С.С. Смородинский, Н.В. Батин. – Минск: БГУИР, 2009. – 64 с.

$$p_j = p_i \cdot B_j, (i, j = 1, \dots, n), j \neq i. \quad (8)$$

Подобным образом производится распределение вероятностей для всех промежуточных и исходных событий. Это обеспечивает целостность и повышает эффективность анализа логико-вероятностной модели ДС, так как позволяет определить и использовать количественную меру важности исходных событий, инициирующих нежелательное корневое событие в системе. Для логических операторов «ИЛИ» события нижних иерархических уровней могут быть интерпретированы как несовместные, поскольку появление любого из них достаточно для инициации корневого события. В этом случае предложенная процедура распределения вероятностей не противоречит теореме сложения вероятностей несовместных событий, в соответствии с которой вероятность появления одного из нескольких несовместных событий равняется сумме вероятностей каждого из них.

Ранжирование событий по важности в задачах диагностики неисправностей МНТО дает техническим службам энергопредприятий новую полезную информацию, необходимую для обоснованного принятия решений по дальнейшей безаварийной эксплуатации ответственного электрооборудования.

Для того, чтобы подчеркнуть целостность и оригинальность предложенного подхода, процедуру усовершенствования метода синтеза и анализа, ранжированных по важности причинно-следственных связей процессов (причин) возникновения неисправностей в МНТО целесообразно детально проиллюстрировать и обсудить на примере проблемной ситуации, которая в последнее время приобрела массовый характер на электрических станциях РФ.

Результаты и обсуждение (Results and discussion)

В составе основного оборудования филиала ПАО «РусГидро» «Новосибирская ГЭС» с 2009 года работают 5 энергоблоков с новыми однотипными силовыми трансформаторами TNEPE-125000/110 PN компании ABB (Asea Brown Boveri Ltd.). В период начала эксплуатации указанного МНТО (2009-2017 гг.) метод анализа растворенных в масле газов (АРГ) зафиксировал систематический устойчивый монотонный рост концентраций оксида и диоксида углерода (CO , CO_2) у каждого из трансформаторов. При этом концентрации остальных характерных газов в масле соответствовали норме. Периодически концентрации CO и CO_2 превышали граничные значения, что указывало на возможное ускоренное старение масла и/или бумажной изоляции под действием повышенного окисления, увлажнения или перегрева. По нормам эксплуатации⁴ требовался дорогостоящий комплекс обследований. Проблемная ситуация с МНТО обострялась тем, что отмеченные факторы в явном виде отсутствовали, а проводимые дегазации масла практически не изменяли указанную тенденцию (рис. 2).

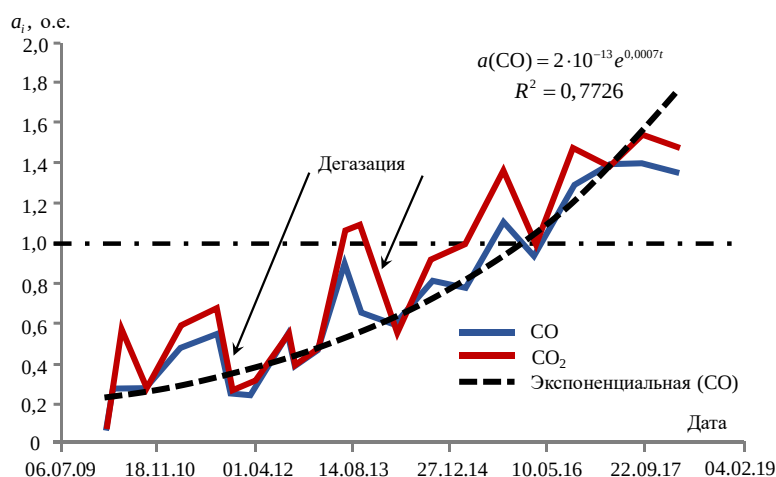


Рис. 2. Изменение концентраций CO и CO_2 в масле трансформаторов Новосибирской ГЭС
Fig. 2. Changes of CO and CO_2 concentrations in the oil of Novosibirsk HPP transformers

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

⁴ СТО РусГидро 02.01.124–2020. Силовые трансформаторы. Организация технической эксплуатации. Нормы и требования. Утвержден приказом ПАО «РусГидро» от 02.12.2020, № 1025. Доступно по: <https://storage.yandexcloud.net/storage.rushydro.ru/iblock/271/271390aa5782df6a8ed46c34f3591641/STO%20RusGidro%2002.01.124-2020%20nov.red.2023.pdf>. Ссылка активна на 05.01.2025.

Опасная для эксплуатации оборудования ГЭС тенденция вызвала обоснованную тревогу службы технической диагностики и требовала более глубокого анализа ситуации с привлечением специальных экспертных знаний и дополнительных исторических данных. Направления и методы разрешения указанной проблемной ситуации подробно описаны в [17]. В данной статье это описание использовано в качестве примера для иллюстрации усовершенствованной процедуры синтеза и анализа ДС, повышающей возможности наблюдаемости опасной неисправности в оборудовании и принятия решений по выявлению и устранению ее причин и последствий.

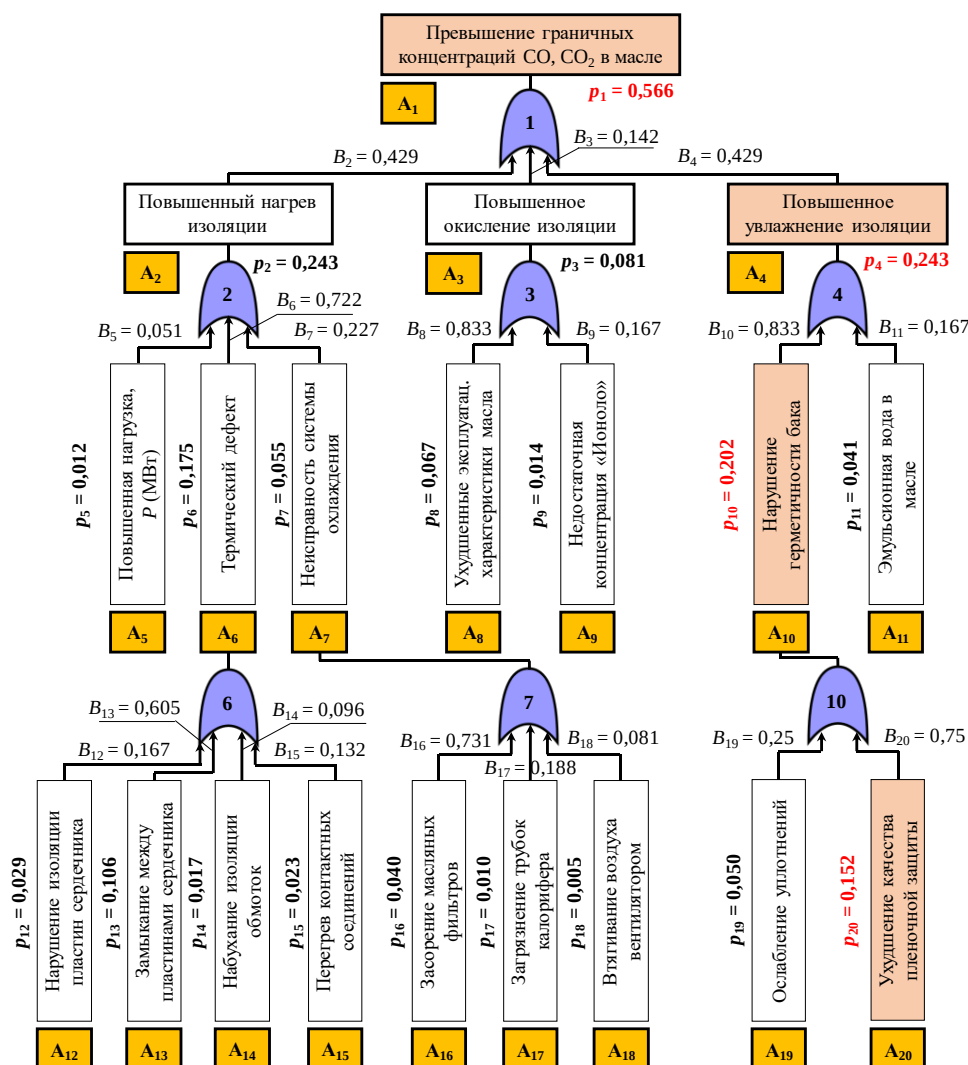


Рис. 3. Логико-вероятностная модель ДС для «Превышение граничных концентраций CO, CO₂ в масле МНТО»

Fig. 3. Logical-probabilistic event tree model for "Exceeding the boundary concentrations of CO, CO₂ in oil of OFTE"

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

Использование предметных знаний в области причин и механизмов возникновения и развития деградиционных процессов в бумажно-масляной изоляции высоковольтного МНТО [18], [19], [20], [21], а также данных из истории его эксплуатации, позволило сформировать логико-вероятностную модель причинно-следственных связей ДС для рассматриваемой проблемной ситуации. Модель ДС приведена на рисунке 3 и отражает последовательность и взаимосвязь случайных событий, предшествующих корневому событию (альтернатива A₁) «Превышение граничных концентраций CO и CO₂ в масле подконтрольного МНТО».

Следует подчеркнуть, что приведенная на рисунке 3 модель ДС представляет собой неотъемлемый компонент разработанной процедуры усовершенствования метода синтеза и анализа ДС для обнаружения опасных неисправностей в МНТО и должна рассматриваться обособленно. Как видно из рисунка модель содержит 7 логических операторов «ИЛИ», объединяющих на нескольких иерархических уровнях 20 альтернатив: A₁ – корневая; A₂, A₃, A₄, A₆, A₇, A₁₀ – промежуточные; A₅, A₈, A₉, A₁₁-A₂₀ – исходные (инициирующие).

Порядковые номера логических операторов «ИЛИ» повторяют номера связанных с ними альтернатив, что повышает удобство описания ДС и не преследует иных целей. Задача выбора и принятия обоснованного решения состоит в том, чтобы проранжировать имеющиеся события по важности их влияния на конечный результат с учетом кинетики и физики возникающих процессов. Формирование МПС для каждого из иерархических уровней ДС сведены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Результаты парного сравнения альтернатив и анализа непротиворечивости оценок
The results of a paired comparison of alternatives and the estimate consistency analysis

МПС для альтернативы A ₁						МПС для альтернативы A ₂					
	A ₂	A ₃	A ₄	Ц _i	B _i		A ₅	A ₆	A ₇	Ц _i	B _i
A ₂	1	3	1	1,442	0,429	A ₅	1	1/9	1/7	0,251	0,051
A ₃	1/3	1	1/3	0,481	0,142	A ₆	9	1	5	3,557	0,722
A ₄	1	3	1	1,442	0,429	A ₇	7	1/5	1	1,119	0,227
Сумма				3,365	1,0	Сумма				4,927	1,0
β				3		β				3,208	
CI				0		CI				0,104	
CR				0		CR				0,180	

МПС для альтернативы A ₃					МПС для альтернативы A ₄				
	A ₈	A ₉	Ц _i	B _i		A ₈	A ₉	Ц _i	B _i
A ₈	1	5	2,236	0,833	A ₈	1	5	2,236	0,833
A ₉	1/5	1	0,447	0,167	A ₉	1/5	1	0,447	0,167
Сумма			2,683	1,0	Сумма			2,683	1,0
β			2		β			2	
CI			0		CI			0	
CR			0		CR			0	

МПС для альтернативы A ₆						
	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₁₅	Ц _i	B _i
A ₁₂	1	1/5	1	3	0,880	0,167
A ₁₃	5	1	3	7	3,201	0,605
A ₁₄	1	1/3	1	1/5	0,508	0,096
A ₁₅	1/3	1/7	5	1	0,699	0,132
Сумма					5,288	1,0
β					4,676	
CI					0,225	
CR					0,250	

МПС для альтернативы A ₇						МПС для альтернативы A ₁₀					
	A ₁₆	A ₁₇	A ₁₈	Ц _i	B _i		A ₁₉	A ₂₀	Ц _i	B _i	
A ₁₆	1	5	7	3,271	0,731	A ₁₉	1	1/3	0,577	0,250	
A ₁₇	1/5	1	3	0,844	0,188	A ₂₀	3	1	1,732	0,750	
A ₁₈	1/7	1/3	1	0,362	0,081	Сумма				2,309	1,0
Сумма				4,477	1,0	β				2	
β				3,065		CI				0	
CI				0,032		CR				0	
CR				0,056							

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

Здесь же приведены расчеты значений весовых коэффициентов альтернатив, а также результаты проверки и анализа непротиворечивости их парных сравнений, выполненные по выражениям (1) – (7).

Рассмотрим подробнее фрагмент расчетов, связанный с формированием МПС для альтернатив A₂, A₃, A₄, являющихся входами логического оператора «ИЛИ» под номером 1. Полученная матрица размерностью (3×3) подлежит построчному заполнению с

использованием предметных экспертных знаний и имеющихся данных по эксплуатации МНТО. На указанном основании главная диагональ МПС заполняется единицами, а в ячейке 2-3 проставляется экспертная оценка «3», отражающая незначительную степень предпочтения A_3 по отношению к A_2 . Предпочтение A_4 по отношению к A_2 принимается равноценным. Подобным образом заполняются остальные ячейки строк МПС. Далее по выражению (1) проводятся расчеты цен альтернатив:

$$Ц_2 = \sqrt[3]{1 \cdot 3 \cdot 1} = 1,442; \quad Ц_3 = \sqrt[3]{\frac{1}{3} \cdot 1 \cdot \frac{1}{3}} = 0,481; \quad Ц_4 = \sqrt[3]{1 \cdot 3 \cdot 1} = 1,442.$$

По (2) находится сумма цен: $Ц = 1,442 + 0,481 + 1,442 = 3,365$. Вычисляются весовые коэффициенты для каждой из альтернатив по выражению (3): $B_2 = \frac{1,442}{3,365} = 0,429$;

$$B_3 = \frac{0,481}{3,365} = 0,142; \quad B_4 = \frac{1,442}{3,365} = 0,429. \text{ При этом } \sum_i B_i = 1. \text{ После определения весовых}$$

коэффициентов выполняется проверка на непротиворечивость парных сравнений экспертных оценок. Для этого по (4) рассчитываются суммы столбцов МПС каждой из альтернатив: $C_2 = 2 \frac{1}{3}$; $C_3 = 7$; $C_4 = 2 \frac{1}{3}$. По (5) находится вспомогательный коэффициент

$$\beta = \left(2 \frac{1}{3} \cdot 0,429 + 7 \cdot 0,142 + 2 \frac{1}{3} \cdot 0,429 \right) = 3 \text{ и по (6) вычисляется индекс согласованности}$$

экспертных оценок $CI = \frac{3-3}{3-1} = 0$. По (7) определяется отношение согласованности оценок

$$CR = \frac{CI}{RC} = \frac{0}{0,58} = 0, \text{ где справочное значение}^3 RC = 0,58 \text{ при } n = 3. \text{ По условию}$$

согласованности $CR \leq 0,2$, что выполняется, поскольку $CR = 0$. Аналогично выполняются расчеты для всех уровней иерархии альтернатив ДС, результаты которых заносятся в табл. 1.

По значениям весовых коэффициентов (B_i), характеризующих важность, для каждой из альтернатив на всех иерархических уровнях ДС, следует рассчитать вероятности событий p_j по формуле (8). Тогда одно из исходных событий, получивших наибольшее значение вероятности, будет интерпретировано как первопричина, и определять наиболее предпочтительный с точки зрения проведенного целостного анализа сценарий их развития. Кроме этого, именно данное событие и будет началом цепи наиболее вероятных взаимосвязанных событий, приводящих к нежелательному результату.

Рассмотрим исходную выборку протоколов АРГ в масле трансформаторов ГЭС на интервале наблюдения 2009-2017 гг. Её объем составил $N = 131$ протокол АРГ в то время как количество протоколов АРГ с превышением граничных концентраций CO , CO_2 , растворенных в масле МНТО N_1 равнялось 74 шт. Таким образом вероятность p_1 появления корневого события A_1 составила $p_1 = \frac{N_1}{N} = \frac{74}{131} = 0,566$ о.е.

Формализацию усовершенствованного метода построения и анализа ДС, дополненного процедурой введения количественной меры важности событий на основе их весовых коэффициентов с применением матриц парных сравнений Саати и приоритизацией исходных альтернатив по значениям вероятностей их возникновения выполним в соответствии с вычислительным алгоритмом, описанным в предыдущем разделе.

Таким образом, назначенные балльные оценки отражают компетентное и непротиворечивое экспертное мнение по вопросам логической взаимосвязи и физической природы деградиационных процессов в эксплуатации бумажно-масляной изоляции высоковольтного МНТО, приводящих к «Превышению граничных концентраций CO , CO_2 , растворенных в масле». Обозначим в модели ДС важность взаимосвязей с помощью рассчитанных весовых коэффициентов альтернатив (B_i) и распределим последовательно по уровням иерархии ДС, начиная с корневого события, вероятности возникновения всех промежуточных и исходных событий (рис. 3).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что наибольшими значениями вероятностей в описанных условиях обладает цепочка событий $A_{20} - A_{10} - A_4 - A_1$. В связи с этим наиболее вероятен сценарий, по которому систематический монотонный рост концентраций CO , CO_2 с превышением предельно-допустимых значений в масле МНТО ГЭС, возникает в результате ухудшения качества пленочной защиты масла, что в свою очередь вызывает нарушение герметичности бака и повышенное увлажнение масла и целлюлозной изоляции трансформаторов. При этом по параметрам текущего мониторинга

состояния МНТО и ретроспективным данным из истории его эксплуатации следует, что такие деградационные факторы, как повышенный нагрев, повышенное окисление масла полностью исключаются. Напротив, повышенное увлажнение изоляции могла вызвать локальная перфорация защитных полимерных пленок у всех единиц МНТО, о чем имеются соответствующие записи в журнале пуско-наладочных испытаний.

Таким образом, усовершенствованный метод синтеза и анализа дерева событий, дополненный процедурой количественной оценки важности причинно-следственных связей, их ранжированием и распределением вероятностей исходов каждого из событий на всех уровнях иерархии по известной вероятности корневого события является эффективным инструментом целостного анализа риска, идентификации опасных неисправностей в оборудовании, определения и прогнозирования причин и последствий их возникновения. Наличие такого вычислительного инструмента в СППР по эксплуатации ответственного электрооборудования расширит её интеллектуальные возможности и обеспечит надежность безаварийной работы энергообъекта.

Заключение (Conclusions)

1. Первостепенной задачей эксплуатации сложного и ответственного оборудования электростанций и электрических сетей, такого как МНТО, является своевременное обнаружение опасных неисправностей, которые могут сопровождаться тяжелыми нежелательными последствиями. Такая задача в полной мере возлагается на специализированные СППР по эксплуатации МНТО, которые призваны выявлять признаки неисправностей, идентифицировать их опасность и причины возникновения, исследовать риски отказов объекта, обеспечить принятие решений по их предупреждению и устранению.

2. Методы синтеза и анализа деревьев событий (отказов) нашли широкое применение в качестве классики жанра для решения подобного вида задач. Дерево событий представляет собой упорядоченное графическое описание причинно-следственных связей случайных событий (отказов, неисправностей), приводящих к реализации нежелательного конечного события. Построение классического ДС выполняется в результате декомпозиции сложной технической системы (оборудования) на структурные элементы и формализации глубоких экспертных знаний в области деградационных процессов в виде её логико-вероятностной модели. Сильные стороны метода анализа ДС: целостность представления системы (объекта); возможность формализации экспертных знаний; универсальность применения к различным объектам и ситуациям. Слабая сторона метода – зависимость адекватности и достоверности результатов его применения от компетентности экспертов (полноты и качества экспертных знаний). Известна идея усовершенствования метода анализа ДС для МНТО включением в расчет компонентов структуры индекса технического состояния.

3. В статье предложена вычислительная процедура для усовершенствования метода, заключающаяся в дополнительной количественной оценке важности причинно-следственных связей событий с применением весовых коэффициентов альтернатив на основе матриц парных сравнений Саати и определением вероятностей исходов каждого из событий на всех уровнях иерархии ДС по известной вероятности ключевого события. Возможность ранжирования промежуточных и исходных событий по важности их влияния на конечный исход позволяет оценить риск реализации любого сценария развития ситуации, определить наиболее вероятный и опасный в существующих условиях сценарий, повысить эффективность принятия эксплуатационных решений по его предотвращению. Разработанный усовершенствованный метод анализа ДС реализован на реальном примере анализа неисправности из практики эксплуатации МНТО «Новосибирской ГЭС». Полученные результаты полностью согласуются с данными из систем диагностического мониторинга трансформаторов и историей их эксплуатации, количественно подтверждают опасность выявленной неисправности и необходимость её устранения. Таким образом, следует заключить, что разработан эффективный инструмент целостного анализа и выявления причин опасных неисправностей в электрооборудовании, который требует цифровизации и интеграции в СППР по его эксплуатации.

Литература

1. Лабабиди М.Р., Система поддержки принятия решений (СППР) как инструмент принятия эффективных управленческих решений на промышленных предприятиях / М.Р. Лабабиди, Н.Р. Кельчевская. – Текст: электронный // Весенние дни науки: сборник докладов международной конференции студентов и молодых ученых (Екатеринбург, 21-23 апреля 2022 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2022. – С. 377-381.

2. Галяутдинова А.Р., Ившин И.В., Соловьев С.А. Система оценки и прогнозирования технического состояния силового маслонаполненного трансформаторного оборудования распределительных сетей с применением машинного обучения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. No 2. С. 32-45. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-32-45.
3. Дерево отказов, как метод структурного анализа FTA. Примеры внедрения. Доступно по: <https://www.itexpert.ru/rus/biblio/detail.php?ID=16266> (дата обращения: 28.01.2025 г.).
4. Andrews J.D. and Dunnett S.J., Event-tree analysis using binary decision diagrams, in *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 49, no. 2, pp. 230-238, June 2000, doi: 10.1109/24.877343.
5. Рябинин И.А., Надежность и безопасность структурно-сложных систем. 2-е изд. перераб. и доп. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. – 276 с.
6. Берман А.Ф., Павлов Н.Ю., Николайчук О.А., Метод синтеза и анализа деревьев отказов на основе понятий механизма и кинетики событий // Проблемы анализа риска. 2018. Т 15. No 3. С. 62-77. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2018-15-3-62-77>.
7. Matsuoka T., Procedure to solve mutually dependent Fault Trees (FT with loops), *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 214, 2021, 107667, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107667>.
8. Demirci M., Gozde H., Taplamacioglu M.C., Fault diagnosis of power transformers with machine learning methods using traditional methods data, *International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering"*, Iss. 49, Vol. 13, No 4, Dec. 2021, pp. 225-230.
9. Васильков Р.Е., Кочетов Н.М., Применение логических деревьев событий при обосновании безопасности опасных производственных объектов // Проблемы анализа риска. 2016. Т. 13. No 1. С. 60-69. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2016-13-1-60-69>.
10. Давиденко И.В., Халикова Е.Д., Учет рисков при выборе очередности мероприятий технического обслуживания силовых трансформаторов // ЭЛЕКТРО. 2014. No 6. С. 32-37.
11. Bicen Yu, Aras F., Smart asset management system for power transformers coupled with online and offline monitoring technologies, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 154, 2023, 107674, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107674>.
12. Левин В.М., Петушков П.А., Швец М.А. Дистанционный мониторинг и управление состоянием трансформаторов в распределительных электрических сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. No 2. С. 97-109. doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-97-109.
13. Wang Yongliang, Li Xiaoqiang, Ma Jianwei and Li SuoYu, Fault diagnosis of power transformer based on fault-tree analysis (FTA), *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 64 (2017) 012099 doi: 10.1088/1755-1315/64/1/012099.
14. Daniella Gonzalez Tinois Da Silva, Halley J. Braga Da Silva, Fernando Pinhabel Marafão, Helmo Kelis Morales Paredes, Flavio Alessandro Serrão Gonçalves, Enhanced health index for power transformers diagnosis, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 126, 2021, 105427, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105427>.
15. Живодерников С.В., Ранжирование силовых трансформаторов по техническому состоянию. Доступно по: <https://forca.ru/stati/podstancii/ranzhirovanie-silovyh-transformatorov-po-tehnicheskomu-sostoyaniyu.html>. Ссылка активна на 28.01.2025.
16. Лесс В.М., Любченко В.Я., Павлюченко Д.А. Анализ энергоэффективности энергетических объектов с применением методов ранжирования // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. No 5. С. 42-58. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-42-58.
17. Левин В.М., Сагалакова К.И., Яхья А.А., О проблемах в эксплуатации оборудования иностранного производства на объектах отечественной энергетики // Научный вестник НГТУ. Т 77. No 4. 2019. С. 147-160.
18. Липштейн Р.А., Шахнович М.И., Трансформаторное масло / Р.А. Липштейн, М.И. Шахнович. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
19. Липштейн Р.А., Глазунова Т.В., Довгопольный Е.Е., Шведские трансформаторные масла фирмы «Nynas» марок Nitro 11 GX и Nitro 10 X / Р.А. Липштейн и др. // Электрические станции. 1998. No 6. С. 61-64.
20. Широков О.Г., Зализный Д.И., Лось Д.М. Методика автоматического обнаружения ненормального нагрева силового трансформатора / О.Г. Широков и др. // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2004. No 4. С. 64-68.
21. Levin V.M., Yahya A.A., Support for Decision-Making to Ensure Reliable Operation of Transformers as Part of a Responsible Power Facility, 2020 *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, Russia, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271626.

Авторы публикации

Левин Владимир Михайлович – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0880-3989>. levin@power.nstu.ru

Зеленских Александр Александрович – аспирант кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3519-0493>. zelenskihaleksandr7@gmail.com

Петушков Пётр Александрович – гл. инженер проекта АО «РЭМиС», г. Новосибирск, Россия. Petushkov@bk.ru

References

1. Lababidi M.R., Sistema podderzhki prinyatiya reshenij (SPPR) kak instrument prinyatiya effektivnykh upravlencheskikh reshenij na promyshlennykh predpriyatiyah / M.R. Lababidi, N.R. Kel'chevskaya. – Tekst: elektronnyj // *Vesennie dni nauki: sbornik докладов mezhdunarodnoj konferencii studentov i molodyh uchenykh* (Ekaterinburg, 21-23 aprelya 2022 g.). – Ekaterinburg: UrFU, 2022. – pp. 377-381. (In Russ.).
2. Galyautdinova A.R., Ivshin I.V., Solov'ev S.A. Sistema ocenki i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya silovogo maslonapolnennogo transformatornogo oborudovaniya raspredelitel'nykh setej s primeneniem mashinnogo obucheniya // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2024. T.26. No 2. S. 32-45. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-32-45. (In Russ.).
3. Derevo otkazov, kak metod strukturnogo analiza FTA. Primery vnedreniya; URL: <https://www.itexpert.ru/rus/biblio/detail.php?ID=16266> (data obrashcheniya: 28.01.2025). (In Russ.).
4. Andrews J.D. and Dunnett S.J., Event-tree analysis using binary decision diagrams, in *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 49, No. 2, pp. 230-238, June 2000, doi: 10.1109/24.877343.
5. Ryabinin I.A., Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh sistem. 2-e izd. pererab. i dop. SPb.: Izd-vo SPbGU, 2007. – 276 p. (In Russ.).
6. Berman A.F., Pavlov N.Yu., Nikolajchuk O.A., Metod sinteza i analiza derev'ev otkazov na osnove ponyatij mekhanizma i kinetiki sobytij // *Problemy analiza riska*, tom 15, 2018, No 3. pp. 62-77. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2018-15-3-62-77>. (In Russ.).
7. Matsuoka T., Procedure to solve mutually dependent Fault Trees (FT with loops), *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 214, 2021, 107667, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107667>.
8. Demirci M., Gozde H., Taplamacioglu M.C., Fault diagnosis of power transformers with machine learning methods using traditional methods data, *International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering"*, Iss. 49, Vol. 13, No 4, Dec. 2021, pp. 225-230.
9. Vas'kov R.E., Kochetov N.M., Primenenie logicheskikh derev'ev sobytij pri obosnovanii bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov // *Problemy analiza riska*. 2016. T. 13. № 1. pp. 60-69. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2016-13-1-60-69>. (In Russ.).
10. Davidenko I.V., Halikova E.D., Uchet riskov pri vybere ocherednosti meropriyatij tekhnicheskogo obsluzhivaniya silovykh transformatorov // *ELEKTRO* 2014. № 6. pp. 32-37. (In Russ.).
11. Bicen Yu, Aras F., Smart asset management system for power transformers coupled with online and offline monitoring technologies, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 154, 2023, 107674, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107674>.
12. Levin V.M., Petushkov P.A., SHvec M.A. Distancionnyj monitoring i upravlenie sostoyaniem transformatorov v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyah // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2023. T.25. № 2. S. 97-109. doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-97-109. (In Russ.).
13. Wang Yongliang, Li Xiaoqiang, Ma Jianwei and Li SuoYu, Fault diagnosis of power transformer based on fault-tree analysis (FTA), *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 64 (2017) 012099 doi: 10.1088/1755-1315/64/1/012099.
14. Daniella Gonzalez Tinois Da Silva, Halley J. Braga Da Silva, Fernando Pinhabel Marafão, Helmo Kelis Morales Paredes, Flavio Alessandro Serrão Gonçalves, Enhanced health index for power transformers diagnosis, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 126, 2021, 105427, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105427>.
15. Zhivodernikov S.V., Ranzhirovanie silovykh transformatorov po tekhnicheskomu sostoyaniyu; URL: <https://forca.ru/stati/podstancii/ranzhirovanie-silovykh-transformatorov-po-tehnicheskomu-sostoyaniyu.html> (data

obrashcheniya: 28.01.2025). (In Russ.).

16. Less V.M., Lyubchenko V.YA., Pavlyuchenko D.A. Analiz energoeffektivnosti energeticheskikh ob'ektov s primeneniem metodov ranzhirovaniya // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2023. T.25. No 5. S. 42-58. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-42-58. (In Russ.).

17. Levin V.M., Sagalakova K.I., Yah'ya A.A., O problemah v ekspluatatsii oborudovaniya inostrannogo proizvodstva na ob'ekтах otechestvennoj energetiki // *Nauchnyj vestnik NGTU*, tom 77, № 4, 2019, pp. 147–160. (In Russ.).

18. Lipshtejn R.A., Shahnovich M.I., Transformatornoe maslo / R.A. Lipshtejn, M.I. Shahnovich. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 296 p. (In Russ.).

19. Lipshtejn R.A., Glazunova T.V., Dovgopolyj E.E., Shvedskie transformatornye masla firmy «Nynas» marok Nitro 11 GX i Nitro 10 X / R.A. Lipshtejn i dr. // *Elektricheskie stancii*. – 1998. – № 6. – pp. 61 – 64. (In Russ.).

20. Shirokov O.G., Zaliznyj D.I., Los' D.M., Metodika avtomaticheskogo obnaruzheniya nenormal'nogo nagreva silovogo transformatora / O.G. Shirokov i dr. // *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Suhogo*. – 2004 – № 4 – pp. 64 – 68. (In Russ.).

21. Levin V.M., Yahya A.A., Support for Decision-Making to Ensure Reliable Operation of Transformers as Part of a Responsible Power Facility, 2020 *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, Russia, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271626.

Authors of the publication

Vladimir M. Levin – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0880-3989>. levin@power.nstu.ru

Aleksandr A. Zelenskih – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3519-0493>. zelenskihaleksandr7@gmail.com

Peter A. Petushkov – JSC "REMiS", Novosibirsk, Russia. Petushkov@bk.ru

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено 27.02.2025 г.

Отредактировано 01.07.2025 г.

Принято 03.07.2025 г.



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Овсянников А.Г.¹, Жарич Д.С.², Швец Н.А.¹

¹Новосибирский Государственный Технический Университет, г. Новосибирск, Россия

²ООО «Сибэнергодиагностика», г. Новосибирск, Россия

shvepsnik@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Немотивированные отключения воздушных линий электропередачи (ВЛ) обычно связаны с перекрытиями линейной изоляции вследствие загрязнения и увлажнения. Достаточно надежными индикаторами опасных уровней загрязнения являются частичные разряды на поверхности изоляции (ПЧР), которые можно обнаружить различными способами. Для профилактического контроля характеристик ПЧР более привлекательны дистанционные неинвазивные методы, основанные на регистрации акустических и электромагнитных сигналов различных частотных диапазонов, а также оптических излучений в инфракрасной (ИК) и ультрафиолетовой (УФ) частях спектра. Для реализации УФ-контроля перспективными считаются дневные УФ-дефектоскопы, известные также под другими названиями: УФ-камеры, УФ-визуализаторы, УФ-пеленгаторы и др. Они регистрируют излучение короны и ПЧР в диапазоне 240-280 нм и могут использоваться в дневное время суток, благодаря светофильтрам, отсекающим солнечное излучение. Однако четких зависимостей характеристик регистрируемых разрядных процессов с степенью загрязнения изоляции и ее влагоразрядными характеристиками до сих пор не получено даже в лабораторных исследованиях. Безусловно определяющую роль в этом играет сложность процессов, но свой вклад вносит и недостаточное знание свойств применяемой аппаратуры и влияния внешних факторов на результаты УФК. ЦЕЛЬ. Провести исследования передаточных характеристик УФ-дефектоскопов нескольких типов, а также оценить влияние среды распространения на результаты УФК. По результатам исследований сформулировать соответствующие ограничения на диапазон настроек аппаратуры и на условия проведения УФК в полевых условиях. МЕТОДЫ. Для решения поставленных задач применялись экспериментальные методы исследования как в лабораторных условиях, так и в процессе УФК реальных объектов. РЕЗУЛЬТАТЫ. Экспериментально установлены зависимости между показаниями счетчика фотонов и площади УФ-излучения от вводимого коэффициента усиления УФ-дефектоскопов. Выявлен двоякий характер влияния паров воды и частиц пыли на результат регистрации интенсивности разрядов. Практическое применение полученных результатов при ультрафиолетовом контроле изоляции дает возможность усовершенствовать процесс диагностики, тем самым увеличивая безотказность работы электротехнических устройств.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи; загрязнение и увлажнение изоляции; поверхностные частичные разряды; ультрафиолетовый контроль; влияние настроек аппаратуры и внешних факторов.

Для цитирования: Овсянников А.Г., Жарич Д.С., Швец Н.А. Сравнительный анализ метода контроля состояния изоляции по ультрафиолетовому излучению поверхностных частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 82-93. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-82-93.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE METHOD OF INSULATION CONDITION MONITORING BY ULTRAVIOLET RADIATION OF SURFACE PARTIAL DISCHARGES

Ovsyannikov A.G.¹, Zharich D.S.², Shvets N.A.¹

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

²LLC "Sibenergodiagnostics", Novosibirsk, Russia

shvepsnik@yandex.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Unreasonable overhead power line outages are typically associated with flashover of line insulation due to contamination and moisture. Partial discharges on the insulation surface are fairly reliable indicators of dangerous levels of contamination and can be detected in a variety of ways. Remote non-invasive methods have become more popular for preventive control of the characteristics of surface partial discharges (SPD), they are based on the registration of acoustic and electromagnetic signals of various partial frequency ranges, as well as optical radiation in the infrared (IR) and ultraviolet (UV) parts of the spectrum. Daytime UV flaw detectors are considered promising for the realization of UV-inspection, they are also known by other names: UV cameras, UV visualizers, UV scanners, etc. These devices register corona radiation and surface partial discharges in the range of 240-280 nm and can be used in the daytime due to light filters cutting off solar radiation. Currently clear relationships between the characteristics of discharge processes and the degree of contamination of the insulation and its moisture-discharge characteristics have not been obtained even in laboratory studies. Of course, the complexity of the processes plays a determining role in that, but insufficient knowledge of the properties of the equipment and the influence of external factors contribute on the UV-inspection results. *PURPOSE.* To investigate the transmission characteristics of several types of UV flaw detectors and to evaluate the influence of the propagation ambience on UV-inspection results. Restrictions on the range of equipment settings and on the conditions for conducting UV-inspection in the field should be formulated based on the research results. *METHODS.* Experimental research methods were used both in laboratory conditions and in the process of UV-inspection of real objects to solve the tasks. *RESULTS.* Relationships between the readings of the photon counter and the area of UV-radiation from the input gain of UV flaw detectors have been experimentally established. Double impact of the effect of water vapors and dust particles on the result of recording the intensity of discharges was revealed. The practical application of the obtained results in ultraviolet inspection makes it possible to improve the diagnostic process, thereby increasing the reliability of electrical devices.

Keywords: overhead transmission lines; contamination and moisture on the insulation; surface partial discharges; ultraviolet inspection; influence of equipment settings and external factors.

For citation: Ovsyannikov A.G., Zharich D.S., Shvets N.A. Comparative analysis of the method of insulation condition monitoring by ultraviolet radiation of surface partial discharges. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (4): 82-93. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-82-93.

Введение (Introduction)

Надежность воздушных линий электропередачи (ВЛ) напрямую зависит от состояния их изоляции, при этом перекрытие загрязненной изоляции остается одной из основных причин аварийных отключений в современных энергосистемах. Несмотря на значительный прогресс в методах диагностики, существующие подходы к оценке состояния изоляции по характеристикам поверхностных частичных разрядов (ПЧР) сталкиваются с рядом ограничений, снижающих достоверность и практическую ценность получаемых результатов.

Ключевая проблема заключается в отсутствии четких корреляционных зависимостей между параметрами регистрируемых ПЧР и фактическим состоянием изоляции. В частности, недостаточно изучены взаимосвязи интенсивности и спектральных характеристик разрядов со степенью поверхностного загрязнения, уровнем увлажнения и стадией деградации изоляционных материалов. Кроме того, существенное влияние на результаты измерений оказывают вариации атмосферных условий и метрологические особенности используемого диагностического оборудования.

Особую актуальность приобретает разработка методов количественной оценки степени загрязнения изоляции, позволяющих перейти от качественных визуальных наблюдений к точным измерительным процедурам. Такой подход требует комплексного исследования как физических процессов формирования ПЧР на загрязненных поверхностях, так и метрологических характеристик современных средств диагностики, в частности УФ-дефектоскопов нового поколения.

Целью исследования является изучить влияние среды распространения на результаты УФ-контроля, а также определить достоверные передаточные характеристики некоторых распространенных УФ-дефектоскопов.

В ходе исследования были получены передаточные характеристики УФ-камер «DayCor Super B», «UVolle – VX», «CoroCam 6», выявлено влияние техногенных факторов и окружающей среды на результаты ультрафиолетового контроля, на основе полученных результатов разработаны рекомендации по улучшению качества УФ-контроля.

Практическая значимость данной работы определяется возможностью повышения точности и достоверности диагностики состояния изоляции без необходимости ее отключения. Разработанные рекомендации позволяют оптимизировать процессы технического обслуживания ВЛ и снизить риски аварийных отключений, что имеет важное значение для обеспечения надежности энергосистем в целом.

Литературный обзор (Literature Review)

Измерения степени загрязнения поверхности изоляции проводят для оценки вероятности перекрытия внешней изоляции оборудования в нормальном эксплуатационном режиме работы высоковольтного оборудования. На выборочных участках линий (ВЛ) демонтируют гирлянды изоляторов, а на распределительных устройствах подстанций – опорные изоляторы, и определяют удельную поверхностную проводимость слоя загрязнения, χ , мксм при увлажнении слоя загрязнения до насыщения. Затем либо проводят испытания разрядных характеристик по стандартным методикам, либо прогнозируют изолирующую способность изоляторов по выполненным оценкам проводимости слоя загрязнения [1]. Учитывая затраты времени и средств на существующие методы контроля, можно понять интерес к разработке дистанционных оценок степени загрязнения.

В группе дистанционных выделяются акустический и электромагнитный методы регистрации обнаружения электрических разрядов. Эффективность контроля оборудования резко увеличилась при сочетанном применении обоих методов с «привязкой» измеряемых сигналов к мгновенным значениям или фазовым углам напряжения на изоляторах [2]. Вместе с тем, в развитии указанных методов просматривается необходимость повышения чувствительности, помехоустойчивости и пространственной разрешающей способности для более точной локализации места возникновения дефекта [3]. На основе этих методов разрабатываются системы мониторинга для непрерывного контроля состояния высоковольтных изоляторов [4].

Заметный вклад в профилактический контроль оборудования изоляции внесли оптические методы, прежде всего инфракрасная термография [5]. При тепловизионном контроле (ТБК) оборудования выявляются «джоулевы» нагревы изоляционных конструкций, вызванные токами утечки по поверхности загрязненных и увлажненных изоляторов. К сожалению, характеристики регистрирующей аппаратуры и объектов наблюдения, а также требования к внешним условиям проведения ТБК ограничивают достоинства метода в части оценки степени загрязнения изоляции. В 21-м веке стал развиваться и метод ультрафиолетового контроля (УФК) оборудования высокого напряжения, основанный на регистрации разрядных процессов, генерируемых различными дефектами, в том числе и загрязнением изоляции. Интенсивность излучения разрядов на поверхности изоляции (ПЧР) при повышенной влажности воздуха, тумане, росе или осадках являются достаточно надежными индикаторами загрязнения и предвестниками перекрытия внешней изоляции.

С появлением УФ-дефектоскопов (УФ-камер, УФ-сканеров, УФ-визуализаторов и т.п.), позволяющих видеть разряды в дневное время возможность дистанционного контроля состояния изоляции по интенсивности разрядов приблизилась к реальному воплощению. В процессе УФ-контроля (УФК) достаточно просто обнаруживаются дефекты, инициирующие коронные разряды на проводах (шинах) и арматуре [6]. Более сложные задачи УФК (оценка степени загрязнения и опасности повреждения разрядами изоляции) потребовали поиска связи между электрическими (амплитуды импульсов тока, заряды и энергия ПЧР) и оптическими (площадь светящихся пятен, показания счетчика фотонов, динамика изменения картины разрядов) характеристиками разрядов. Исследовалось также влияние различных факторов на результаты регистрации УФ-излучения ПЧР.

К достоинствам работы В. Pinnangudi и его коллег [7] можно отнести методику количественной оценки интенсивности УФ-излучения с учетом влияния фоновой освещенности, угла наблюдения, расстояния, рассеяния и поглощения УФ-излучения туманом. Зависимости регистрируемого излучения от расстояния оказались близки к хорошо известному закону снижения освещенности обратно пропорционально квадрату расстояния между приемником и точечным источником излучения. При высоковольтных испытаниях полимерных изоляторов авторы [7] обнаружили тесную корреляцию между зарядом короны на металлических оконцевателях изоляторов и площадью пятна (количеством пикселей) изображения короны на дисплее УФ-камеры. Данное наблюдение

согласуется с выводом Г. Ретера [8] о прямой пропорциональности между числом фотонов и количеством актов ионизации в электронных лавинах. Следует заметить, что указанная закономерность справедлива только для «холодных» разрядов: электронных лавин и стримеров, а на загрязненной и увлажненной изоляции разряды развиваются по нескольким физическим механизмам в последовательности «электронная лавина – стример – лидер – дуга». Поэтому следует ожидать более сложной связи между электрическими характеристиками и свойствами УФ-излучения разрядов. Для их установления разрабатываются модели разрядных процессов на загрязненной и увлажненной изоляции, в том числе с применением нейронных сетей и нечетких множеств для прогнозирования напряжения перекрытия [9]. В [10] установлено, что площадь УФ-излучения в камере SogoCAM504 увеличивается с увеличением интенсивности разрядов на полимерном изоляторе 110 кВ, но имеет нелинейную характеристику в диапазоне усиления от 50 до 80 %. На основе исследования была создана модель адаптивной нейро-нечеткой системы вывода (ANFIS) и с ее помощью реализована достаточно точная оценка заряда короны при различных усилениях камеры и расстояниях до очага разрядов. В других исследованиях установлено, что при низкой степени загрязнения максимальная площадь факела излучения разряда и заряд зависят линейно от проводимости слоя загрязнения и косинуса угла наблюдения, но при больших загрязнениях площадь факела разряда растет быстрее, чем проводимость.

Счетчики фотонов разных производителей при прочих равных условиях дают разные показания, а ряд моделей демонстрируют нелинейные зависимости количества фотонов от вводимого усиления [11]. Для первого дневного в линейке дефектоскопов «Филин» [12] разрабатывается методика оценки интенсивности излучения по числу и яркости пикселей в изображении факела ПЧР. В [13] предложена технология гиперспектральной визуализации для определения уровня загрязнения полимерных изоляторов. На основе гиперспектральных данных, собранных в испытательных лабораториях, создана методика оценки степени загрязнения полимерного изолятора, устраняющая влияние фонового освещения в полевых условиях.

Авторы [14] пытались найти связь между характеристиками УФ-излучения и стадией развития разрядов на гирлянде загрязненных и увлажненных туманом фарфоровых изоляторов класса напряжения 750 кВ. При неизменной степени загрязнения стадии развития разрядов изменялись с уровнем приложенного напряжения и делились на три степени: коронные разряды (напряжение 200-300 кВ), перемежающиеся дужки (200-400 кВ) и непрерывно развивающиеся дуги (500 кВ). Было установлено, что число УФ-пятен и области их формирования могут только говорить об опасности разрядов, но не могут использоваться для количественной оценки. С другой стороны, было замечено, что по среднему числу пятен УФ-излучения стабильно повторяющихся в каждом кадре видеозаписи и снижению разброса этого числа со 100 до 20 % можно говорить о переходе к стадии непрерывно удлиняющейся дуги, т.е. к стадии близкой к напряжению перекрытия.

Авторы [15] (базовой для разработки отраслевого стандарта EPRI публикации) с помощью камеры DAYCOR провели две серии испытаний партии изоляторов с различной степенью загрязнения поверхности. На открытом стенде изучалась динамика развития ПЧР в различных условиях увлажнения, а затем в испытаниях по стандартным методикам определялись влагоразрядные характеристики гирлянд. Стадии разрядной активности вплоть до перекрытия были разделены на шесть типов (рис. 1) в зависимости от уровней бросков тока утечки, которые, в свою очередь, зависят как от уровня загрязнения, так и от степени увлажнения слоя загрязнения.

1. Разряды почти отсутствуют: камера DAYCOR фиксирует очень низкий уровень разрядной активности. Ток утечки через изолятор составляет менее 1 мА.

2. Корона: изображения на дисплее камеры, связанные с короной на загрязненных изоляторах, выглядят как стабильные пятна, расположенные вокруг стержня изолятора. Ток утечки через изолятор не превышает 1 мА.

3. Импульсные вспышки представляют собой яркие вспышки, возникающие редко и одновременно на нескольких изоляторах гирлянды. Амплитуды бросков тока утечки, связанных с вспышками, изменяются в пределах 10-50 мА.

4. Непрерывное мерцание проявляется в виде частых ярких вспышек, беспорядочно возникающих в различных местах гирлянды. Как и в случае с коронными разрядами, эти вспышки возникают в областях с наибольшей плотностью тока, т.е. вокруг стержней изоляторов. Броски тока утечки, в моменты разрядной активности, составляют 40-70 мА.

5. Импульсные дуги на сухих полосах поверхностного загрязнения очень похожи на импульсные вспышки, но более интенсивны и могут охватывать почти всю длину гирлянды

изоляторов. Они по-прежнему очень кратковременны и в большинстве случаев замечаются только в одном видеокadre. Броски тока утечки, связанные с этой активностью, составляют 60-100 мА.

6. Интенсивная дуга в сухой зоне проявляется в виде очень интенсивных и пульсирующих дуговых разрядов, которые могут охватывать почти всю длину изолятора и вспыхивать в нескольких периодах напряжения вплоть до полного перекрытия. Сопровождающие броски тока утечки обычно превышают 100 мА.

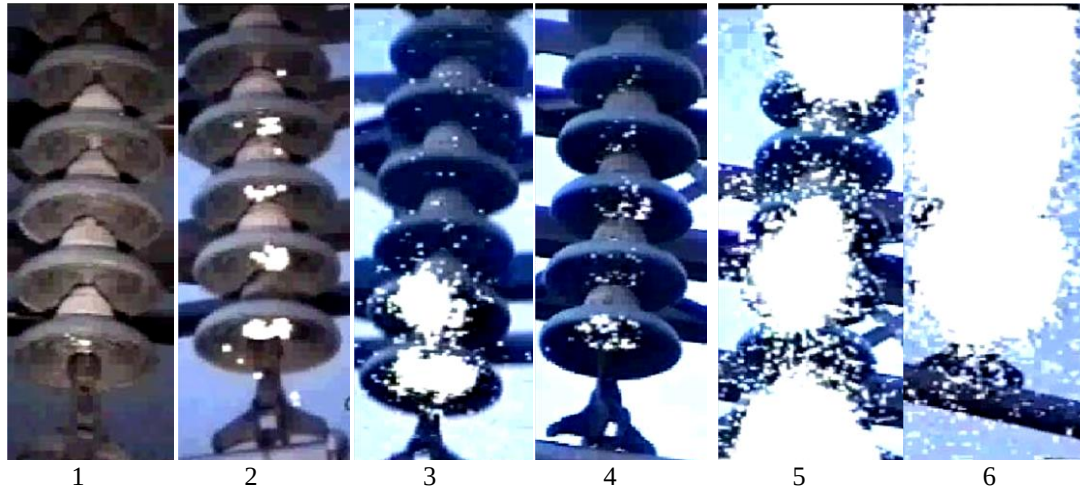


Рис. 1. Шесть стадий разрядной активности в испытаниях влагоразрядных характеристик гирлянд тарельчатых изоляторов

Fig. 1. Six stages of discharge activity in testing moisture-discharge characteristics of insulator string

*Источник: Составлено авторами [15] Source: compiled by the author [15].

Наблюдаемые закономерности разрядов коррелируют с общепринятыми представлениями о стадиях развития разряда при загрязнении изолятора.

Методика оценки загрязнения, обоснованная в [15], адаптирована в практические рекомендации «Инструкции по эксплуатации камеры CoroCam 7» [16]. В ней особо выделена роль оптимального режима увлажнения слоя загрязнения. Отмечается, что разряды могут отсутствовать на сильно загрязнённых изоляторах, если слой загрязнений высох или слишком переувлажнен. Указаны факторы, влияющие на степень увлажнения поверхности изолятора: относительная влажность воздуха на высоте подвески изоляции; предшествующие (дождь накануне, ясная холодная ночь) и текущие (скорость ветра, температура) природные явления. Влияет также и толщина слоя загрязнения: чем толще слой загрязнения, тем больше влаги поглощается в нем. Несмотря на применение солнечно-слепых дефектоскопов рекомендуется регистрацию разрядов проводить «в ночное время суток или ранним утром, поскольку в указанное время суток велика вероятность проявления разрядной активности, связанной с загрязнением поверхности изоляторов».

Решение о необходимости и сроках проведения обмыва изоляторов зависит от наличия и типа разрядов и их повторяемости в кадрах видеозаписи. При слабых уровнях загрязнения, когда ток утечки меньше 1 мА, разряды на изоляторах либо отсутствуют, либо возникают только коронные разряды. В условиях умеренного загрязнения с бросками тока утечки в диапазоне 10-50 мА (при чрезмерном увлажнении – в диапазоне 40-70 мА) возникают диффузные разряды различной периодичности. В таких случаях чистка и обмыв изоляторов могут потребоваться, но не в скором времени.

Признаками опасного загрязнения изоляторов являются периодически повторяющиеся контрагированные дуговые разряды в сухих зонах слоя загрязнения с бросками тока утечки от 60 до 100 мА. В этих случаях обмыв изоляторов следует сделать в ближайшее время. Признаком близости к перекрытию гирлянды служит периодическое возникновение интенсивных, удлиняющихся почти на всю гирлянду дуговых разрядов с бросками тока более 100 мА. В таких случаях обмыв изоляции нужно выполнить немедленно.

Сделаем ряд пояснений и замечаний по кратко изложенной методике [15].

– Обнаружены ошибки, касающиеся идентификации типа разрядов (возможно, были неточности в переводе). Так, судя по изображениям на видеокadre, под коронными разрядами понимаются и корона на металлических частях, и ПЧР на тарелках изоляторов. То, что называется «тлеющими разрядами», противоречит физике газового разряда, т.к.

тлеющие разряды формируются при пониженных давлениях и имеют четкую структуру светящихся областей каналов. То, что отражено на видеокдрах, мы бы назвали диффузным свечением, вызванным, скорее всего, отражениями УФ-излучения разрядов (дужек ПЧР) от микрокапелек пара, возникающего при подсушке слоя загрязнения током утечки. Под термином «сухой дуговой разряд» по-видимому надо понимать дуговой разряд, перекрывающий сухую зону слоя загрязнения на поверхности изолятора.

– Заметная доля рассмотренных в «Инструкции...» [16] случаев заканчивается ссылкой на неопределённость интерпретации из-за недостоверности полученных данных. По-видимому, это связано с преобразованием реальной картины разрядов в поле пятен на дисплее УФД, возникающих, в том числе и от рассеяния на частицах пара в среде распространения.

Материалы и методы (Materials and methods)

В первой серии испытаний исследовалось рассеяние УФ-излучения в среде распространения. В лабораторном опыте луч УФ-светодиода направлялся перпендикулярно оптической оси камеры «DayCam Super B» с усилением Gain = 120. В контрольной части опыта на дисплее камеры наблюдались отражения УФ-излучения на редких пылинках в воздухе (рис. 2а). Значительно больше отражений возникало на капельках пара разогревающегося чайника, расположенного ниже области наблюдения (рис. 2б). Время нагрева легко вычислить по разнице между моментами съемки двух кадров: 20:05 – 20:04 ≈ 1 мин.

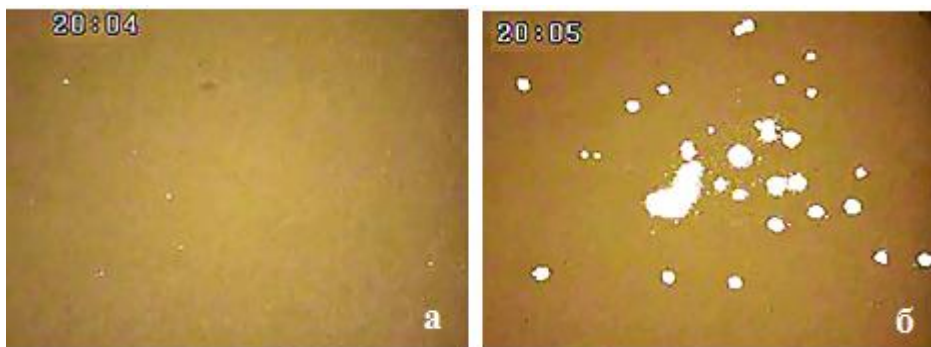


Рис. 2. Рассеяние УФ-излучения на пылинках (а) и на частицах пара (б) Fig. 2. Scattering of UV radiation by dust particles (a) and by vapor particles (b)

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

На рисунке 3 приведена картина с дисплея УФ-камеры «CogoCam 7» при обследовании ВЛ 110 кВ во время легкой утренней дымки (тумана). Вокруг натяжных гирлянд изоляторов концентрировалась группа пятен рассеянного каплями тумана УФ-излучения от разрядов короны на арматуре и ПЧР на изоляторах гирлянды (попавшие в рамку счета фотонов).

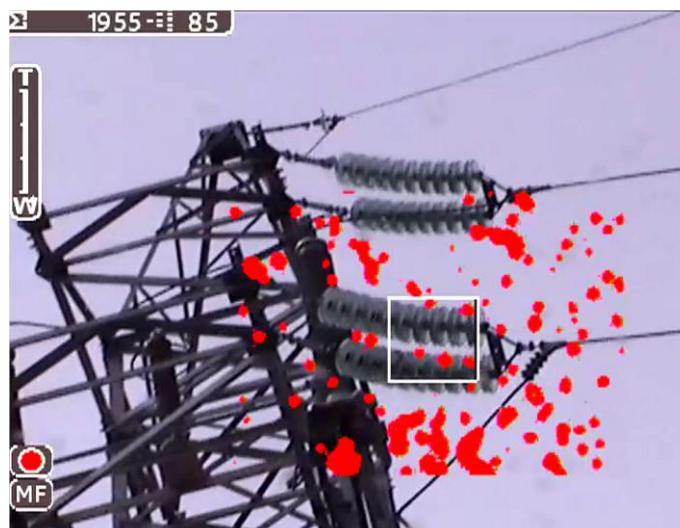


Рис. 3. Рассеяние частицами тумана УФ-излучения разрядов на ВЛ 110 кВ Fig. 3. Scattering of UV radiation from discharges on 110 kV overhead power lines by fog particles

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

На рисунке 4 приведены картины с дисплея УФ-дефектоскопа «Филин 7», полученные при обследовании электрооборудования металлургического комбината.

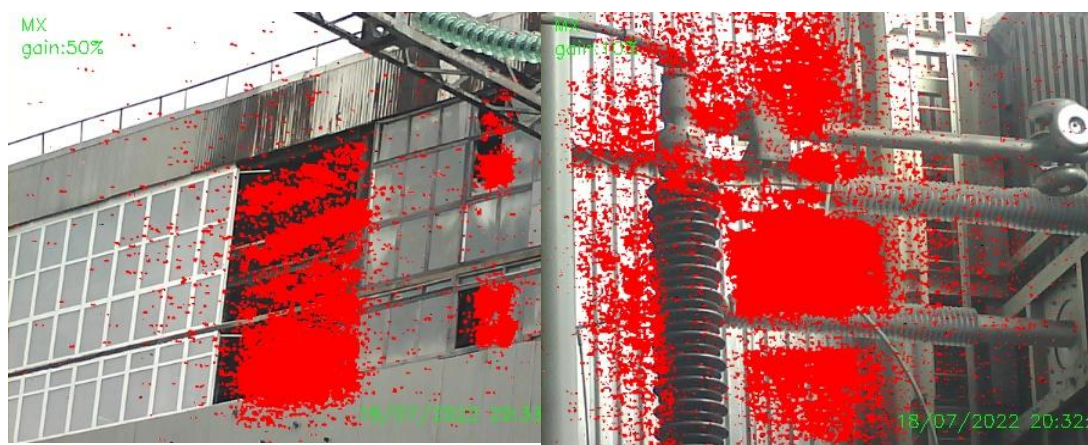


Рис. 4. Отражение сторонних УФ-излучений на частицах производственной пыли, вылетающей из открытых окон цеха (слева) и падающей на изоляторы ОРУ 220 кВ (справа)

Fig. 4. Reflection of external UV radiation on particles of industrial dust flying out from open windows of the workshop (left) and falling on insulators of 220 kV outdoor switchgear (right)

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

На левом снимке видны пятна отраженных УФ-излучения внешних источников (предположительно от электросварки), а на правом они же и рассеянные УФ-излучения разрядов на оборудовании ОРУ 220 кВ. Понятно, что отделить полезные сигналы от разрядов на оборудовании и помехи от внешних источников излучения невозможно.

Во второй серии опытов исследовалась зависимость показаний счетчика «УФ-событий» (Counting) от значения установленного коэффициента усиления (Gain). Испытаниям подвергались УФ-камеры «DayCor Super B» и UVolle – VX. В качестве источника УФ-излучения использовался прибор «Дарсонваль» с насадкой «Капля». Интенсивность УФ-излучения регулировалась. Расстояние между источником УФ-излучения и УФ-камерами составляло 235 см и не менялось.

Результаты (Results)

В опыте с УФ-камерой «DayCor Super B» мощность УФ-излучения устанавливалась максимальной. Зависимость показаний счетчика от усиления имеет максимум при усилении 130-140 (рис. 5), а области УФ-излучения равномерно увеличивались с ростом усиления (рис. 6).

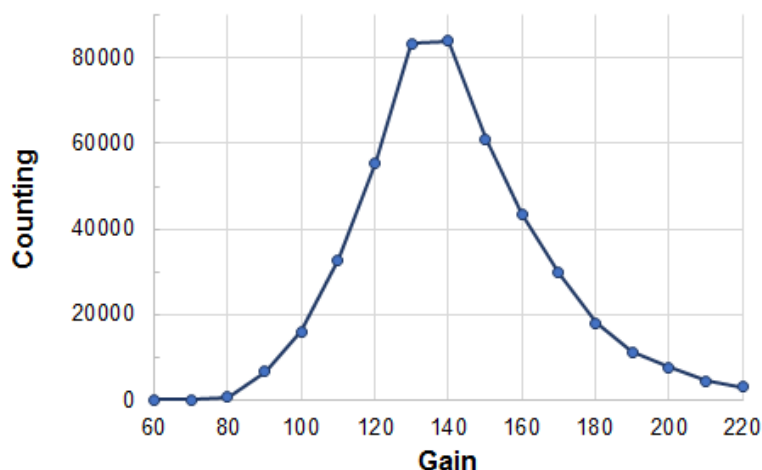


Рис. 5. Показания счетчика фотонов камеры «DayCor Super B» от усиления

Fig. 5. Readings of the photon counter in the camera "DayCor Super B" vs the Gain

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

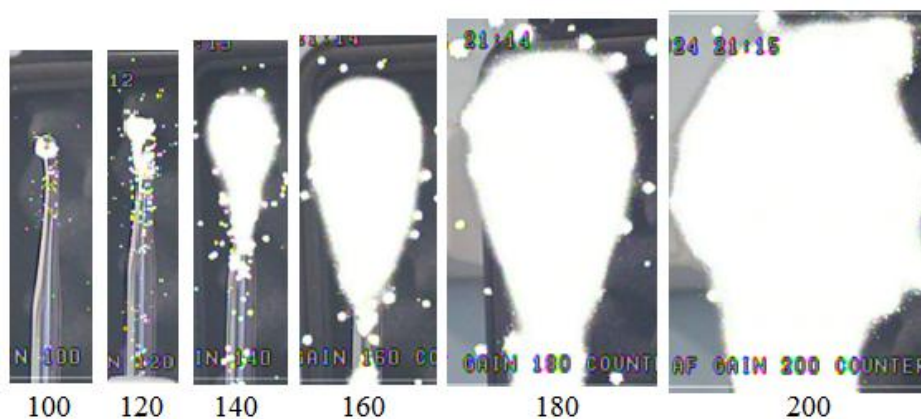


Рис. 6. Изменение картины УФ-излучения при росте усиления от 100 до 200%

Fig. 6. Changes in the UV radiation pattern with an increase of Gain from 100 up to 200%

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

В опытах с УФ-камерой UVolle – VX мощность излучения устанавливалась минимальной. Показания счетчика монотонно росли с увеличением усилением до 50% и потом оставались практически неизменными (рис. 7), как и размеры области УФ-излучения.

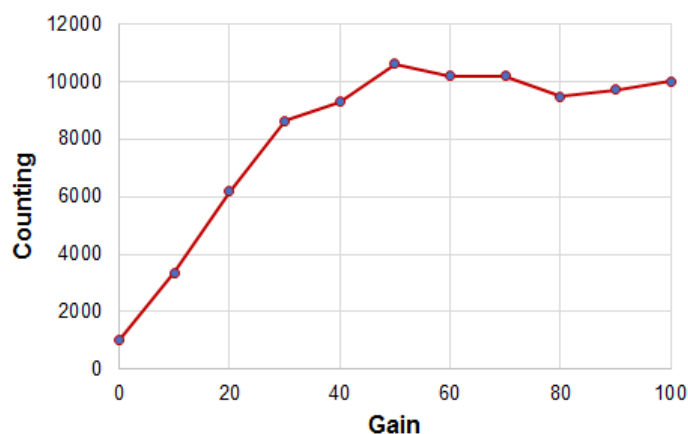


Рис. 7. Зависимость показаний счетчика фотонов от усиления камеры «UVolle – VX»

Fig. 7. Photon counter readings of the UVolle – VX camera vs Gain

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

На рисунке 8 приведены скриншоты дисплея УФ-камеры «CoroCam 6» с картинками разрядов, полученными при двукратном изменении усиления камеры и почти такими же изменениями показаний счетчика фотонов. Этот факт говорит о линейности счетчика фотонов относительно коэффициента усиления в рабочем диапазоне его изменения. Вместе с тем, заметно, что площадь пятна разряда растет с опережающим темпом по сравнению с «количеством фотонов».

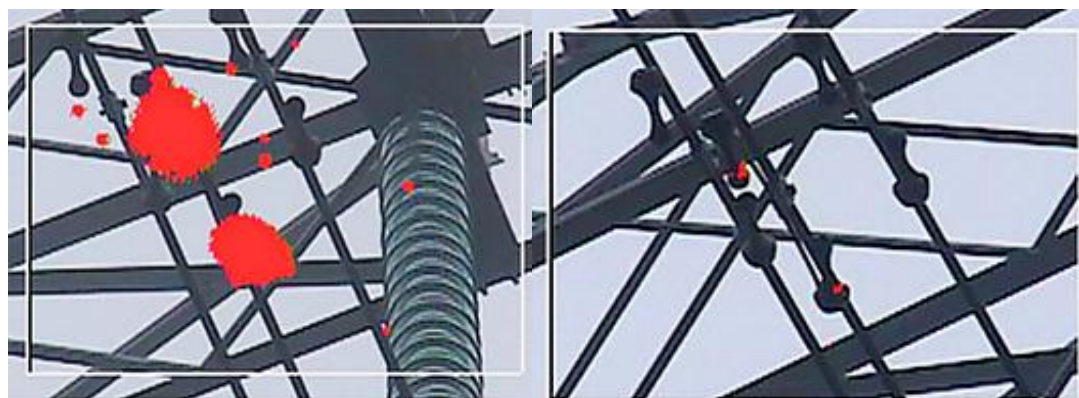


Рис. 8. Показания счетчика фотонов при изменении усиления «CoroCam 6»

Fig. 8. Photon counter readings vs the Gain of the «CoroCam 6» camera

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

Обсуждение (Discussions)

Во-первых, хотелось обратить внимание на несколько следствий, связанных с отражениями УФ-излучения на частицах в среде распространения на пути от места возникновения разрядов до приемника (рис. 2). По-видимому, частицы не столько поглощают излучение, сколько за счет отражения способствуют увеличению числа фотонов, регистрируемых встроенным счетчиком, и увеличению площади факела УФ-излучения. Дело в том, что подсушка слоя загрязнения при нагреве токами утечки сопровождается образованием пара, а отражение УФ-излучений разрядных процессов от капелек пара приводит к ложному приросту интенсивности и диффузному виду излучения разрядов особенно в заключительных стадиях перед перекрытием изоляции (стадии 5 и 6 на рисунке 1). Косвенным доказательством могут служить и литературные данные о снижении регистрируемой интенсивности излучения разрядов с увеличением расстояния. В полученных результатах этих исследований показатель степени ослабления был близок, но оставался меньше 2, и наоборот больше 2 не было ни одном случае. Этот факт говорит о том, что влияние отражения на частицах преобладает над поглощением излучения. В полевых регистрациях к указанному эффекту ложного усиления интенсивности разрядов за счет отражений УФ-излучения от собственных разрядов могут добавляться и помехи в виде отражений внешних УФ-излучений (рис. 3 и 4), что практически исключает проведение УФК.

Во-вторых, коснемся еще раз неопределенностей в показаниях счетчиков фотонов, известных как из литературных источников, так и из результатов данных исследований, приведенных на рисунках 5 и 7. Эти недостатки становятся особенно заметными при оценке степени загрязнения изоляции. В уже упомянутой «Инструкции...» [16] признается, что «... параметр подсчета УФ-событий не имеет никакого отношения к методике интерпретации изображений». Кроме того, критерии браковки по «числу фотонов» становятся абсолютно неприемлемыми при неблагоприятных метеорологических условиях, т.к. корона с капель дождя на проводах и шинах появляется или усиливается в десятки раз, приводя к росту показаний счетчика фотонов никак не связанным с загрязнением изоляции. Влияние на показания «счетчика фотонов» настроек усиления и свойств вспышек УФ-излучения отмечалось нами в [11]. Настоящими исследованиями определены области приближенной линейной связи между усилением и показаниями счетчика фотонов для камер "DayCor Super B" – 90 ... 130 % и «UVolle – VX – 0 ... 50 %. В камере «CoroCam 6» усиление 0,85 (85%) устанавливается при включении камеры «по умолчанию», и совершенно точно линейность показаний счетчика сохраняется до этого значения. Тем не менее надо помнить, что число фотонов» даёт лишь приблизительное представление об интегральной силе УФ-излучения и недостаточно для заключения о степени загрязнения изоляции.

В целом методика оценки степени загрязнения с помощью дневных УФ-дефектоскопов, по нашему мнению, далека от требуемого обеспечения данными о физической картине явлений и их связи с условиями во время УФК регистрации, а также о метрологической надежности характеристик, измеряемых дневными УФ-дефектоскопами. К настоящему времени можно говорить только о качественной связи между интенсивностью УФ-излучения ПЧР и степенью загрязнения и увлажнения или напряжением перекрытия изоляции. Одно из главных препятствий для успеха в разработке имеет объективный характер возможность проведения УФК в дневное время в большинстве случаев не способствует условиям образования мощных ПЧР, которые предшествуют перекрытиям изоляции, о чем уже говорилось.

Заключение (Conclusions)

1. При обследовании оборудования УФ-камерами «DayCor Super B» предпочтительно работать в диапазоне усиления $\text{Gain} = 90 \dots 130$, «UVolle – VX» – в диапазоне $\text{Gain} \leq 50$ и «CoroCam 6» – $\text{Gain} \leq 50$. При этом обнаружение разрядов можно проводить и при больших значениях усиления во избежание пропусков дефектов. Сравнивать показания счетчиков камер некорректно.

2. При оценке степени загрязнения изоляции можно пользоваться рекомендациями [16] с учетом возможного завышения регистрируемой интенсивности разрядов вследствие отражений УФ-излучений от разрядов на контролируемом объекте и от внешних источников техногенного характера на капельках испарений влаги из слоя загрязнения, а также тумана и др.

Перспективным направлением для дальнейшей работы является исследование зависимости уровня загрязнения высоковольтной внешней изоляции от спектра излучения поверхностных частичных разрядов.

Применение вышеперечисленных рекомендаций при обследовании высоковольтной изоляции посредством УФ-дефектоскопов позволит повысить качество диагностики и, как следствие, надежность электрооборудования.

Литература

1. Владимирский, Л.Л., Соломоник, Е.А. Развитие методов выбора внешней изоляции электроустановок высокого напряжения // *Электрические станции*. 2015. № 12. С. 23-36.
2. Голенищев-Кутузов А.В., Ахметвалеева Л.В., Еникеева Г.Р., Иванов Д.А., Семенников А.В., Марданов Г.Д. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2020. Т. 22. № 2. С.117-127. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127.
3. Иванов Д.А. Исследование электрофизических процессов и старения материала высоковольтных изоляторов для определения их рабочего ресурса // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022. Т. 24. № 2. С. 132-146. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-132-146.
4. Галиева Т.Г., Иванов Д.А., Садыков М.Ф., Андреев Н.К., Хамидуллин И.Н. Метод и устройство диагностики состояния высоковольтных изоляторов на основе непрерывной регистрации пространственного уровня электромагнитного излучения частичных разрядов // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022. Т. 24. № 4. С. 165-177. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177.
5. Зарипов Д.К., Насибуллин Р.А., Закиров Д.Ф., Захаров А.В. Исследование работы полимерного изолятора при увлажнении искусственным туманом // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2023. Т.25. № 5. С. 20-29. doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-5-20-29.
6. Мараев А.М. Диагностика изоляторов и жил токопроводов с помощью УФ-дефектоскопа и тепловизора // *Энергоэксперт*. 2020. № 1. С. 68-71.
7. Pinnangudi, B.; Gorur, R. S.; Kroese, A. J. Quantification of Corona Discharges on Nonceramic Insulators // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2005. vol. 12, no. 3. pp. 513-523. doi: 10.1109/TDEI.2005.1453456.
8. Петер Г. Электронные лавины и пробой в газах, пер. с англ. под ред. В. С. Комелькова. - М.: Мир, 1968. 390 с.
9. Cai, W.; Deng, H.; Zhou, G.; Wang, J.; Yang, F. Online Measurement of Equivalent Salt Deposit Density by Using Optical Technology // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013. vol. 20, no. 2. pp. 409-413. doi:10.1109/TDEI.2013.6508741.
10. Wang, S.; Lv, F.; Liu, Y. Estimation of Discharge Magnitude of Composite Insulator Surface Corona Discharge based on Ultraviolet Imaging Method // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2014. vol. 21, no. 4. pp. 1697-1704. doi:10.1109/TDEI.2014.004358
11. Овсянников А. Г., Арбузов Р. С., Жарич Д. С., Швец Н. А. Ультрафиолетовый контроль высоковольтного оборудования. - М: НТФ «Энергопрогресс», [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик». 2025. вып. 4 (316)]. 106 с.
12. Арбузов Р.С., Жарич Д.С., Кандауров А.С., Масленников А.Л., Овсянников А.Г. Повышение эффективности контроля высоковольтного оборудования с помощью УФ-дефектоскопов // *Энергия Единой Сети*. 2023. Т. 69. № 2. С. 32-39.
13. Liu, Y.-P.; Kong, Y.; Huang, Z.; Geng, J.; Liu, J. Super Pixel-Level Contamination State Detection Model of Composite Insulator Specimens Under Different Lighting Conditions Based on Hyperspectral Technology and Model Transfer // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2024. vol. 31, no. 3. pp. 1611-1619. doi: 10.1109/TDEI.2023.3346853.
14. Cai-Jing *et al.* The Quantitative Indicators of 750 kV Porcelain Insulator in UV detection based on Artificial Contamination Test / *IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*. 2016. Montpellier, France. pp. 501-505. doi: 10.1109/ICD.2016.7547652.
15. Phillips, A.J.; Engelbrecht C.S. The Feasibility of Using Daytime Corona Inspection to Identify Contaminated Insulators that Needs to be Washed // *CIGRE Session, Paris, 2008. Paper B2 – 213*. URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/b2-213-2008-the-feasibility-of-using-daytime-corona-inspection-to-identify-contaminated-insulators-that-needs-to-be-washed.html>
16. Field Guide: Daytime Discharge Inspection of Transmission and Distribution Overhead Lines and Substations: Guide with Video. EPRI, Palo Alto, Ca: 2012, 3002002028. Методические указания по УФ-контролю подвесной и опорно-стержневой изоляции с помощью камеры CoroCam. 2013. Вып. 1, Перевод на русский. – М.: ООО «Панатест». 2014. 116 с.

Авторы публикации

Овсянников Александр Георгиевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» ФГБОУ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия. *E-mail: oag@nspsb.ru*

Жарич Дмитрий Сергеевич – заместитель начальника ЭТЛ, ООО «Сибэнергодиагностика», г. Новосибирск, Россия. *E-mail: jds@sibenedia.ru*

Швец Николай Андреевич – ведущий инженер филиала АО «Россети Научно-технический центр» – СибНИИЭ, аспирант кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» ФГБОУ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия. *E-mail: shvepsnik@yandex.ru*

References

1. Vladimirskiy L.L.,; Solomonik, E.A. Development of methods for choosing external insulation of high -voltage electrical installations // *Electric stations*. 2015. # 12. pp. 23 – 36. (In Russ).
2. Golenishchev-Kutuzov A.V., Akhmetvaleeva L.V., Enikeeva G.R., Ivanov D.A., Semennikov A.V., Mardanov G.D. Remote testing for defects in service high-voltage insulators. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(2): 117-127. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127> (In Russ).
3. Ivanov D.A. Study of electrophysical processes and aging of the material of high-voltage insulators to determine their working life. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(2):132-146 <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-132-146>. (In Russ.)
4. Galieva T.G., Ivanov D.A., Sadykov M.F., Andreev N.K., Khamidullin I.N. Methodology and device for diagnostics of high-voltage insulators based on continuous recording of the spatial level of electromagnetic radiation of partial discharges. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24(4): 165-177. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177> (In Russ.)
5. Zaripov D.K., Nasibullin R.A., Zakirov D.F., Zakharov A.V. Study of operation of a polymer insulator under uniform and non-uniform contamination. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25(5): 20-29. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-5-20-29>. (In Russ.)
6. Maraev A.M. Diagnostics of insulators and cores of busbars using a UV flaw detector and a thermal imager. *Energoexpert*, No. 1, pp. 68-71, 2020. (In Russ.)
7. Pinnangudi, B.; Gorur, R. S.; Kroese A. J. Quantification of Corona Discharges on Nonceramic insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2005. vol. 12, no. 3. pp. 513-523. doi: 10.1109/TDEI.2005.1453456.
8. Raether, H. Electron avalanches and breakdown in gases. 1964.
9. Cai, W.; Deng, H.; Zhou, G.; Wang, J.; Yang, F. Online Measurement of Equivalent Salt Deposit Density by Using Optical Technology. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013. vol. 20, no. 2. pp. 409-413. doi:10.1109/TDEI.2013.6508741.
10. Wang, S.; Lv, F.; Liu, Y. Estimation of Discharge Magnitude of Composite Insulator Surface Corona Discharge Based on Ultraviolet Imaging Method. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2014. vol. 21, no. 4, pp. 1697-1704. doi:10.1109/TDEI.2014.004358.
11. Ovsyannikov A.G., Arbuzov R.S., Zharich D.S., Shvets N.A. Ultraviolet testing of high-voltage equipment. - M: NTF "Energoprogress". [Library of electrical engineering, supplement to the journal "Energetik". 2025. issue. 4 (316)]. 106 p. (In Russ.)
12. Arbuzov R.S., Zharich D.S., Kandaurov A.S., Maslennikov A.L., Ovsyannikov A.G. Improving the efficiency of high-voltage equipment testing using UV flaw detectors // *Energy of the Unified Network*. 2023. No. 2 (69). pp. 32-39. (In Russ.)
13. Liu, Y.-P.; Kong, Y.; Huang, Z.; Geng, J.; Liu, J. Super Pixel-Level Contamination State Detection Model of Composite Insulator Specimens Under Different Lighting Conditions Based on Hyperspectral Technology and Model Transfer. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2024. vol. 31, no. 3. pp. 1611-1619. doi: 10.1109/TDEI.2023.3346853.
14. Cai-Jing *et al.* The quantitative indicators of 750 kV Porcelain Insulator in UV detection based on Artificial Contamination Test / *IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*. 2016. Montpellier, France. pp. 501-505. doi:10.1109/ICD.2016.7547652
15. Phillips, A.J.; Engelbrecht C.S. The feasibility of using daytime corona inspection to identify contaminated insulators that needs to be washed / *CIGRE Session, Paris*. 2008. Paper B2 – 213. URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/b2-213-2008-the-feasibility-of-using-daytime-corona-inspection-to-identify-contaminated-insulators-that-needs-to-be-washed.html>.

16. Field Guide: Daytime Discharge Inspection of Transmission and Distribution Overhead Lines and Substations: Guide with Video. EPRI, Palo Alto, Ca: 2012, 3002002028.

Authors of the publication

Alexander G. Ovsyannikov – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. *E-mail: oag@nsps.ru*

Dmitry S. Zharich – LLC "Sibenergodiagnostics", Novosibirsk, Russia. *E-mail: jds@sibenedia.ru*

Nikolay A. Shvets – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. *E-mail: shvepsnik@yandex.ru*

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено **01.02.2025 г.**

Отредактировано **03.08.2025 г.**

Принято **12.08.2025 г.**

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА

Фролов М.Ю.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
myu.frolov@gmail.com

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке методики настройки фильтра Калмана для задач автоматического управления режимом работы синхронного генератора при отсутствии возможности прямого измерения всех необходимых для этого величин, что позволяет синтезировать оптимальные и адаптивные регуляторы. ЦЕЛЬ. Определить подход к настройке фильтра Калмана для задач управления режимом синхронного генератора. Определить качество фильтрации выходных параметров и оценки неизмеряемых режимных параметров в условиях возмущающих воздействий на входе и шума в измерительных каналах. МЕТОДЫ. При решении поставленной цели применялись методы математического моделирования, реализованные средствами MatLab/Simulink. Использовались методы математической статистики и оптимизации. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описан метод настройки фильтра Калмана, который позволяет определить вектор переменных состояния без линеаризации модели синхронного генератора. Проведено исследование влияния компонентов матриц спектральных плотностей Q и R на качество фильтрации и оценки состояния режимных параметров на примере угла поворота ротора и скорости вращения. Для исследования была создана цифровая модель с синхронным генератором из стандартной библиотеки MatLab/Simulink и с генератором в пространстве состояний. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Установлено, что, изменяя компоненты матриц Q и R фильтра, можно влиять на скорость схождения оцененных параметров к истинным значениям. Если компоненты этих матриц равны мощностям спектральных плотностей возмущающих воздействий и шумов в измерительных каналах, то ошибка оценивания будет стремиться к нулю. По результатам экспериментов было установлено, что такой же результат достигается, если компоненты матриц Q и R не равны мощностям спектральных плотностей возмущений и помех, но при этом между компонентами матриц Q и R должна сохраняться также пропорция, что и при их формировании вышеупомянутым способом.

Ключевые слова: фильтр Калмана; форма вход-состояние-выход; уравнение движения ротора; наблюдатель Люенбергера; линейно-квадратичный наблюдатель.

Для цитирования: Фролов М.Ю. Оценка состояния режимных параметров синхронного генератора на основе фильтра Калмана // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 94-103. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-94-103.

STATE ESTIMATION OF SYNCHRONOUS GENERATOR MODE PARAMETERS BASED ON KALMAN FILTER

Frolov M.Yu.

Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia
myu.frolov@gmail.com

Abstract: RELEVANCE of the research is to develop a methodology for the Kalman filter tuning for the problem of synchronous generator control in the operation mode. This allows us to synthesize optimal and adaptive controllers. The complication consists in the absence of the possibility of direct measurement of all the necessary quantities. THE PURPOSE. To determine the approach of Kalman filter tuning for the control problems in the operating mode of a synchronous generator. To determine the filtering quality of the output signals and estimation of

the operating parameters with disturbance in the input channels and noise in the measuring ones. **METHODS.** To achieve the aim, the methods of mathematical modeling implemented by MatLab/Simulink tools were used. The methods of mathematical statistics and optimization were used. **RESULTS.** The paper describes the algorithm for Kalman filter tuning that allows to determine the vector of state variables without linearizing the synchronous generator model. The research was conducted on the influence of noise covariance matrix Q and R for quality filtration and parameters estimation of rotor angle and speed. For the research, a digital model with a synchronous generator from the MatLab/Simulink library was designed and another one was designed with a generator in the state space. **CONCLUSION.** It has been established that matrices Q and R influence on the speed of movement of the estimated parameters by the true values. If the matrices components are equal the power spectral densities of the disturbances and noise in these measuring channels, the measurement error will tend for zero. The same result is obtained if the components of the Q and R matrices do not have the necessary power spectral densities of disturbances and noise, but at the same time, between the components of the Q and R matrices, it is necessary to maintain the same proportion as when they are created by the above-mentioned method.

Keywords: Kalman filter; state space representation; rotor motion equation; Luenberger observer; linear quadratic estimator.

For citation: Frolov M.Yu. State estimation of synchronous generator mode parameters based on Kalman filter. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (4): 94-103. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-94-103.

Введение (Introduction)

Синхронная машина характеризуется большим количеством переменных величин, такие как: токи, напряжения, мощности скорости и т.д. При составлении математических моделей таких объектов для задач управления принято разделять переменные на несколько категорий:

- входные сигналы $u_1, u_2, u_3, \dots, u_n$;
- выходные сигналы $y_1, y_2, y_3, \dots, y_m$;
- переменные состояния $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$;
- внешние возмущения f и помехи измерений ζ .

Переменные состояния обычно не измеряются, поэтому возникает задача оценки состояния, которая формулируется следующим образом. По известным, наблюдаемым входным и выходным сигналам, а также известным параметрам и структуре модели определить (оценить) вектор переменных состояния x . Например, на крупных электростанциях датчики угла ротора и скорости генератора обычно не устанавливаются.

Переменные состояния могут быть использованы в оптимальных, самонастраивающихся и адаптивных системах управления, поэтому существует несколько подходов для оценки состояния динамических объектов, один из которых состоит в построении наблюдателя. Устройство, формирующее на выходе вектор оценки состояния, называется наблюдателем (наблюдатель Люенбергера) [1]. Наблюдатель, способный отделять полезный сигнал от помех, называется фильтром.

Существует множество подходов к синтезу наблюдателей:

- модальный наблюдатель на основе решения уравнения Сильвестра [2, 3];
- наблюдатель на основе решения неравенства Ляпунова LMI (linear matrix inequalities) [4, 5];
- Линейные квадратичные наблюдатели (синтез по интегрально-квадратичному критерию) (linear quadratic estimator) LQE [6];
- Фильтр Калмана и его модификации. (Расширенный фильтр Калмана EFK [7-10], без запаха Unscented UFK (он же сигма-точечный) [9-11], и т.д. [12, 13]).

По определённым причинам наибольшую популярность получил Фильтр Калмана. Во-первых, он позволяет получить наилучшие результаты при зашумлённых сигналах измерения. Во-вторых, при совместном использовании Фильтра Калмана с линейно-квадратичным регулятором (linear quadratic regulator, LQR) [14, 15] можно решить задачу о линейно-квадратичном гауссовском управлении (linear quadratic Gaussian, LQG) [16, 17]. То есть синтезировать оптимальный регулятор по интегрально-квадратичному критерию на основании известной математической модели объекта управления и измеренным входным и выходным величинам.

В самом общем случае задача фильтрации по Калману может быть сформулирована для нелинейных нестационарных объектов при наличии коррелированного случайного процесса, но большинство исследователей рассматривают задачу оценивания, сформулированную в пространстве состояний для линейного стационарного объекта при наличии белого шума.

Математические модели, построенные на основе полных уравнений Парка-Горева, и уравнения движения ротора являются нелинейными, что создаёт трудности для построения систем регулирования. Часть исследователей производят линеаризацию модели и используют классический фильтр Калмана, что может привести к значительной ошибке оценивания при значительных изменениях режима. Часто используется расширенный фильтр Калмана, который подразумевает линеаризацию в каждый момент времени. Для его работы необходимо с течением времени пересчитывать Якобиан на каждом интервале, что может требовать больших вычислительных мощностей.

Набирает популярность вариация под англоязычным названием «Unscented filter Kalman», в русскоязычной литературе нет устоявшегося перевода. Используют дословный перевод фильтр Калмана «без запаха» или сигма-точный фильтр Калмана. В этом варианте строится приближение распределения плотности вероятности случайной величины после прохождения через нелинейное преобразование. Такой подход позволяет работать с резко нелинейными функциями, однако также может привести к большим затратам вычислительных мощностей.

Для определения таких параметров как угол поворота ротора генератора и скорость вращения ротора использование сложных модификаций Фильтра Калмана не обязательна, поэтому в данной статье будет использован обычный вариант фильтра Калмана. Это станет возможно благодаря тому, что за входной сигнал принимается сумма моментов на валу машины. Тем самым уравнение движения ротора будет считаться линейным, стационарным.

Стоит отметить, что для решения задачи оценивания чаще всего используют модели в дискретном исчислении [5]. В статье задача решается для непрерывных функций, тем самым количество математических преобразований сведено к минимуму.

Основная цель исследования состоит в разработке метода настройки фильтра Калмана для оценки параметров состояния синхронного генератора. Для достижения поставленной цели разработан принцип формирования матриц спектральных плотностей фильтра Калмана. Для исследования предложенного метода была создана модель в MATLAB/Simulink. Наиболее важные результаты: предложен метод настройки фильтра Калмана, который позволяет добиться минимальной погрешности оценки режимных параметров; особенности метода позволяют использовать линейную модель синхронной машины без процедуры линеаризации; объяснено влияние матриц спектральных плотностей на скорость и достоверность оценки переменных состояния. Значимость полученных результатов состоит в том, что предложенный метод можно внедрить в систему автоматического регулирования синхронной машиной.

Материалы и методы (Materials and methods)

А. Математическая модель машины как объект оценки состояния

Для проведения исследования в качестве модели синхронной машины выбрана следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega \\ T_j \dot{\omega} + K_d \omega = M_{mech} - M_{el} = \Delta M \end{cases} \quad (1)$$

где θ – угол поворота ротора; ω [рад/с] – угловая скорость ротора; T_j , [с] – постоянная инерции синхронного генератора; K_d – коэффициент трения M_{mech} [о.е.] – механический момент турбины; M_{el} [о.е.] – электромагнитный момент генератора; ΔM – сумма моментов на валу ротора генератора.

В системе (1) первое уравнение устанавливает связь между углом поворота и скоростью вращения ротора. Второе – уравнение движения ротора, которое описывает равноускоренное движение ротора при возникновении небаланса моментов на валу. Относительно угла и скорости система (1) состоит из дифференциальных уравнений первого порядка, что позволяет легко перейти к матричной форме записи:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{K_d}{T_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{T_j} \end{bmatrix} \Delta M$$

Полученное матричное уравнение называется уравнением состояния.

Предполагается, что для измерения доступен только угол поворота ротора, поэтому необходимо дополнить модель уравнение наблюдения:

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix}$$

Введём обозначения:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{-K_d}{T_j} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ T_j \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix}, u = \Delta M$$

В свёрнутом виде модель выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (2)$$

Система (2) называется моделью или системой уравнений в пространстве состояния. В (2) вектор столбец x – вектор состояния, который характеризует состояние системы в определённый момент времени. Понятие состояние введено Калманом в середине XX века [1]. Остальные составляющие системы (2): A – квадратная матрица состояния размерностью 2×2 ; B – матрица управления размерностью 2×1 ; C – матрица наблюдения размерностью 2×1 ; u – вектор управления (входов) размерностью 1×1 ; y – вектор наблюдений (выходов) размерностью 1×1 и состоит только из угла θ .

В канал управления может вмешиваться внешнее возмущение f , а в измерительный канал помеха измерений ξ , что может отрицательно влиять на адекватность системы управления. При помехах значительной величины необходимо дополнить модель объекта следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + f \\ y = Cx + \xi \end{cases} \quad (3)$$

В частном случае f и ξ могут являться неизвестными детерминированными сигналами, но при постановке задачи для фильтра Калмана они считаются случайными неизвестными сигналами, которые не могут быть непосредственно измеренными.

Б. Оценка параметров фильтром линейно-квадратичным наблюдателем и Калмана

Математическое описание линейно-квадратичного наблюдателя и Фильтра Калмана основывается на уравнениях наблюдателя и описывается следующими матричными уравнениями.

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(\hat{y} - y) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (4)$$

$\hat{x}$ – оценка вектора состояния;

$\hat{y}$ – оценка вектора наблюдений;

L – матрица наблюдателя.

Матрицы A , B , C абсолютно такие же, как у объекта генератора, поэтому, чтобы воспользоваться фильтром Калмана, необходимо знать параметры генератора. Определить их можно либо из паспортных данных, либо методами идентификации, например, методом наименьших квадратов [18].

Постановка задачи о *линейно-квадратичном наблюдателе*: найти матрицу L наблюдателя, при которой $\hat{x}$ точно сходится к x , если посторонние сигналы f и ξ таковы, что критерий доверия

$$J = \int_{-\infty}^t (f^T Q^{-1} f + \xi^T R^{-1} \xi) dt \quad (5)$$

принимает наименьшее возможное значение при данном выходе $y(t)$.

Известно, что найти матрицы Q и R , при которых критерий (5) будет минимальным, можно, решив алгебраическое уравнение Риккати (первое уравнение в системе (6)). Затем можно определить матрицу L (второе уравнение в системе (6)).

$$\begin{cases} AP + PA^T + Q - PC^T R^{-1} CP = 0 \\ L = -PC^T R^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

В ходе решения системы уравнений необходимо найти матрицы P , L .

Если $Q \succeq 0$ (Q положительно полуопределённая матрица), $R \succ 0$ (R положительно определённая матрица), пара (C, A) обнаруживаема, пара (A, B) стабилизируема, то из всех решений уравнения Риккати только одно положительно определено и динамика ошибки соответствующего наблюдателя асимптотически устойчива. Состояние $\hat{x}$, такого наблюдателя будет с нулевой ошибкой сходиться к состоянию x объекта при условии, что посторонние сигналы f и ξ минимизируют критерий доверия и при этом не противоречат

измеряемому сигналу $y(t)$.

Постановка задачи о Фильтре Калмана: найти матрицу L наблюдателя такую, что $\hat{x}$ точно сходится к x при этом средний квадрат отклонения, установившийся ошибки наблюдателя

$$\lim_{t \rightarrow \infty} M \left(\|x(t) - \hat{x}(t)\|^2 \right)$$

примет наименьшее возможное значение.

В этом случае для рассматриваемой модели фильтра фактически решается задача оптимальной фильтрации, при которой оптимальный коэффициент усиления наблюдателя (матрица наблюдателя) определяется выражением

$$L = -PC^T R^{-1},$$

где P – уникальное положительно-полуопределенное решение алгебраического уравнения Риккати

$$AP + PA^T + Q - PC^T R^{-1} CP = 0,$$

где матрицы Q и R свою очередь определяются, исходя из критерия доверия.

$$J = \int_{-\infty}^t (f^T Q^{-1} f + \xi^T R^{-1} \xi) dt$$

Здесь возмущение f и помеха ξ являются гауссовским белым шумом (случайные процессы с нулевым математическим ожиданием и равномерной спектральной плотностью);

Q и R – это матрицы спектральных плотностей этих сигналов;

δ – дельта функция;

M – математическое ожидание.

Если компоненты f независимы, то Q будет диагональной. Если компоненты ξ независимы, то R будет диагональной.

Найти матрицу L наблюдателя для фильтра Калмана из тоже самой системы (6), что и для линейно-квадратичного наблюдателя, только тут матрицы Q и R это матрицы спектральных плотностей сигналов f и ξ .

Чтобы синтезировать линейно-квадратичный наблюдатель или фильтр Калмана необходимо:

1. Выбрать $Q \geq 0$ и $R > 0$ так, чтобы они отражали распределение доверия между тем, что рассчитывает наблюдатель, и тем, что сообщают датчики
2. Найти решение $P > 0$ уравнение Риккати $AP + PA^T + Q - PC^T R^{-1} CP = 0$
3. Вычислить L по формуле $L = -PC^T R^{-1}$.

Далее в статье будет показано, что для достижения наилучшего результата матрицы Q и R нужно брать таким образом, чтобы они являлись матрицами спектральных плотностей f и ξ .

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Для проведения исследований в программном комплексе MATLAB Simulink была собрана модель (рис. 1).

Модель состоит из трёх частей. Первая часть «Power system» – это небольшая электрическая система, состоящая из синхронного генератора 200 МВА 13,8 кВ, работающего на нагрузку 150 МВт. Генератор оснащён регулятором скорости, который осуществляет регулирование по пропорционально-дифференциальному закону. Регулирование возбуждения не осуществляется. В качестве возмущающего воздействия выступает включение нагрузки 10 МВт в 5 секунд. Из первой части выводится сигнал разности моментов на валу генератора ΔM , который является входящим сигналом u для второй и третьей части схемы.

Вторая часть «Generator» – это система уравнений (3), собранная для генератора с теми же параметрами, что и в первой части модели. Третья часть «Kalman Filter» – система уравнений фильтра Калмана (4).

Во второй и третьей части модели есть блоки, позволяющие выводить переменные состояния x и выхода y для построения графиков.

На данной модели приняты обозначения:

f, ksi – моделируемые сигналы внешних возмущений и помехи измерений;

$X, Y, Yksi$ – вектор состояния объекта, вектор измерения без учета выходной помехи и с ее учетом соответственно;

Xk, Yk – вектор состояния и вектор измерения фильтра Калмана (т.е. оценки вектора состояния и вектора измерения объекта).

Запись $A*uvеc, B*uvеc, C*uvеc$ и $L*uvеc$ обозначает векторное умножение матриц

A, B, C или L на соответствующий входной сигнал.

Для моделирования возмущающих воздействий и помех измерения использовался блок «Band-Limited White Noise». Спектральная плотность сигнала f для угла и скорости – 0,005, сигнала ξ – 0,0001.

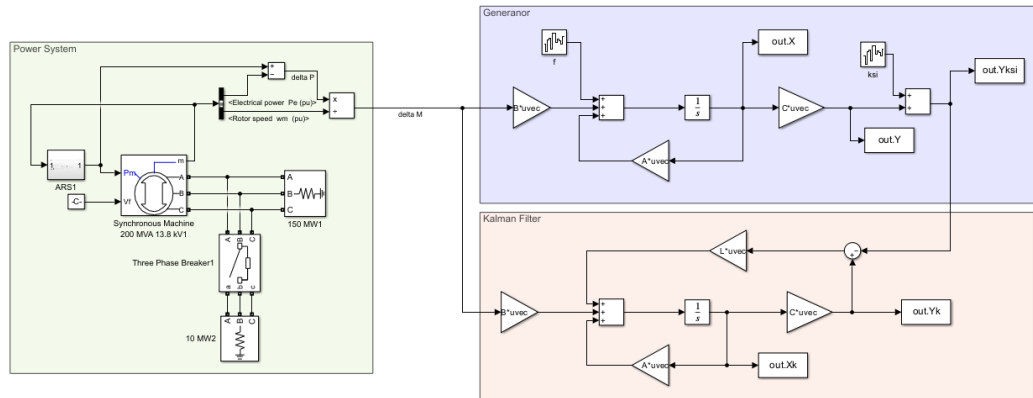


Рис. 1. Модель в MATLAB Simulink

Fig. 1. Model in MATLAB Simulink

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

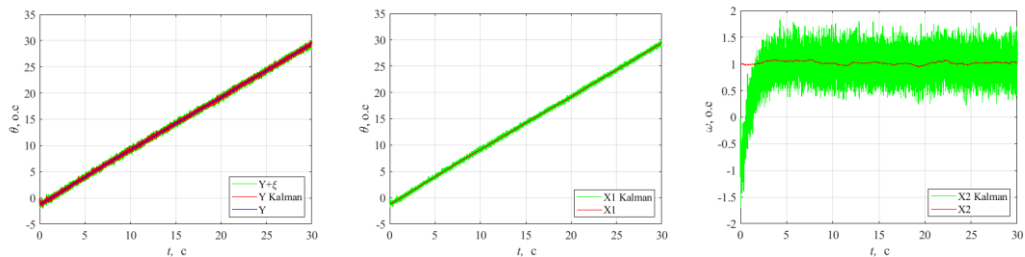


Рис. 2. Осциллограммы сигналов выхода и состояний при $Q = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}$ $R = [0,001]$ Fig. 2. Output and state oscillograms at $Q = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}$ $R = [0,001]$

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

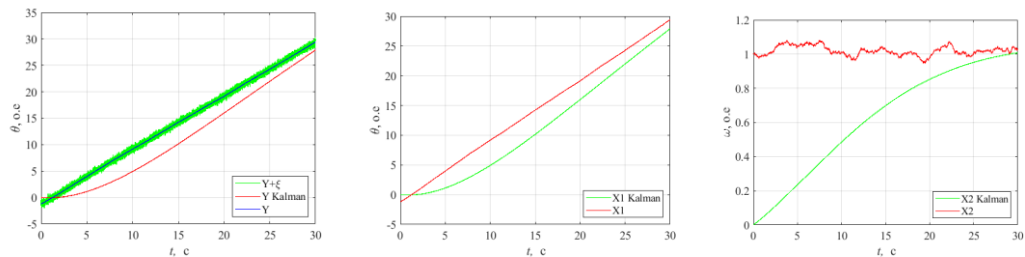


Рис. 3. Осциллограммы сигналов выхода и состояний при $Q = \begin{bmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,01 \end{bmatrix}$ $R = [100]$ Fig. 3. Output and state oscillograms at $Q = \begin{bmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,01 \end{bmatrix}$ $R = [100]$

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

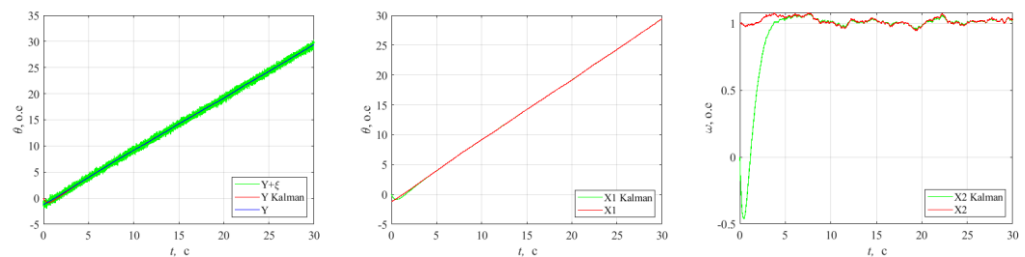


Рис. 4. Осциллограммы сигналов выхода и состояний при $Q = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}$ $R = [1]$ Fig. 4. Output and state oscillograms at $Q = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}$ $R = [1]$

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

При выполнении экспериментов выбирались различные величины компонентов матриц Q и R для определения их влияния на качество оценки переменных состояния x и фильтрации выходного сигнала y .

В первом опыте матрица спектральных плотностей возмущающего сигнала была взята большой $Q = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}$, нули вне главной диагонали означают, что корреляция между возмущениями угла и скорости отсутствует. Матрица спектральной плотности помехи измерения выходного сигнала была принята маленькой $R = [0,001]$. Такая тактика в выборе матриц спектральных плотностей справедлива, если есть основания полагать, что возмущение f большое, а помеха ξ маленькая. В этом случае матрица фильтра Калмана получается с большими коэффициентами $L = \begin{bmatrix} -1001 \\ -1012 \end{bmatrix}$. При выполнении эксперимента предполагалось, что начальные значения угла θ и скорости ω не известны, поэтому большие коэффициенты матрицы L позволили добиться быстрой сходимости параметров, однако возник негативный эффект. Фильтр Калмана действует таким образом, как будто помех в выходном сигнале практически нет, и сигнал $\hat{y}$ повторяет по форме сигнал y . В итоге сигналы оценки сигналов $\hat{x}$ и $\hat{y}$ сильно зашумлены. Особенно наглядно степень зашумлённости видна если сравнить исходный и оцененный сигнал скорости (рис. 2).

Во втором опыте матрица Q была выбрана маленькой ($Q = \begin{bmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,01 \end{bmatrix}$), а матрица R большой ($R = [100]$). В результате, матрица L получилась с маленькими коэффициентами ($L = \begin{bmatrix} -0,14 \\ -0,01 \end{bmatrix}$). Результаты этого эксперимента получились противоположными. Маленькие коэффициенты матрицы L привели к долгой сходимости оцененных параметров к реальным, что делает практически невозможным использование такой оценки для задач управления в реальном времени, например для регулятора скорости. Фильтр воспринимает выходной сигнал, как сильно искажённый, из-за чего возникает большая инерция в движении оценки сигналов к реальным (рис. 3).

В третьем опыте были приняты следующие значения $Q = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}$ и $R = [1]$. В результате расчёта матрица коэффициентов фильтра имеет следующий вид $L = \begin{bmatrix} -3,07 \\ -2,22 \end{bmatrix}$.

В этом случае ошибка между оцененными параметрами и реальными отсутствует (рис. 4). Такой результат можно объяснить тем, что спектральные плотности сигналов $f(0,005)$ и $\xi(0,0001)$ имеют такое же соотношение, что и коэффициенты в матрицах Q и R .

Заключение или Выводы (Conclusions)

В ходе экспериментов было установлено, что, выбирая матрицы Q и R , можно влиять на скорость схождения оцениваемых параметров к реальным параметрам. Причём влияет не столько величина коэффициентов, сколько разница между ними. Чем больше Q по отношению к R , тем быстрее сходится оценка. В обратном случае результат противоположный.

В случае если возмущающие воздействия и помехи измерения представляют из себя белый шум, то, зная мощности их спектральных плотностей, фильтр Калмана позволяет определить параметры состояния и выходов объекта таким образом, что ошибка будет стремиться к нулю.

Аналогичные результаты можно получить, если возмущения и помехи будут не случайными, а детерминированными сигналами. Тогда задача сводится к более простой.

Литература

1. D. Luenberger, "An introduction to observers," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 16, no. 6, pp. 596-602, December 1971, doi: 10.1109/TAC.1971.1099826
2. V. Radaisavljevic-Gajic and F. O. M. Safieh, "Discrete-Time Optimal Quadratic Performance Loss of a Linear Reduced Order Observer Based Controller Designed via a Sylvester Equation," 2024 4th International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Male, Maldives, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECCME62383.2024.10796489. P. V. S. Nag,

- C. S. Kumar, K. C. S. thampatty and T. B. Isha, "A modified approach for application of Augmented Extended Kalman filter for stator interturn fault diagnosis of a synchronous generator," 2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), Chennai, India, 2018, pp. 465-469, doi: 10.1109/ICEES.2018.8442354.
3. J. Carvalho, K. Datta and Yoopyo Hong, "A new block algorithm for full-rank solution of the Sylvester-observer equation," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 48, no. 12, pp. 2223-2228, Dec. 2003, doi: 10.1109/TAC.2003.820150.
4. K. -X. Cui and G. -R. Duan, "Adaptive Disturbance Observer Design for Discrete-Time High-Order Fully Actuated Systems Based on LMI and Its Application to Combined Spacecrafts," 2023 2nd Conference on Fully Actuated System Theory and Applications (CFASTA), Qingdao, China, 2023, pp. 12-17, doi: 10.1109/CFASTA57821.2023.10243313.
5. K. -X. Cui and G. -R. Duan, "Adaptive Disturbance Observer Design for Discrete-Time High-Order Fully Actuated Systems Based on LMI and Its Application to Combined Spacecrafts," 2023 2nd Conference on Fully Actuated System Theory and Applications (CFASTA), Qingdao, China, 2023, pp. 12-17, doi: 10.1109/CFASTA57821.2023.10243313.
6. R. Molavi, K. Shojaee and D. A. Khaburi, "Optimal vector control of permanent magnet synchronous motor," 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference, Johor Bahru, Malaysia, 2008, pp. 249-253, doi: 10.1109/PECON.2008.4762479.
7. M. Ai, Y. Sun and X. Lv, "Dynamic state estimation for synchronous machines based on interpolation H_∞ extended Kalman filter," 2018 33rd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), Nanjing, China, 2018, pp. 555-559, doi: 10.1109/YAC.2018.8406436.
8. L. Peng, L. Xie, F. Wu and C. Li, "Field-oriented control of synchronous motor based on adaptive extended Kalman filter," 2011 IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems, Beijing, China, 2011, pp. 633-637, doi: 10.1109/CCIS.2011.6045146.
9. P. S. Madhukar and L. B. Prasad, "State Estimation using Extended Kalman Filter and Unscented Kalman Filter," 2020 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control and Computing (ICONC3), Lakshmangarh, India, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICONC345789.2020.9117536.
10. A. I. Ilieș, G. Chindriș and D. Pitică, "A Comparison between State of Charge Estimation Methods: Extended Kalman Filter and Unscented Kalman Filter," 2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Pitesti, Romania, 2020, pp. 376-381, doi: 10.1109/SIITME50350.2020.9292232.
11. K. Kyslan, V. Šlapák, V. Petro, A. Marcinek and F. Ďurovský, "Speed Sensorless Control of PMSM with Unscented Kalman Filter and Initial Rotor Alignment," 2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE), The High Tatras, Slovakia, 2019, pp. 373-378, doi: 10.1109/EDPE.2019.8883918.
12. Y. Li, J. Li, J. Qi and L. Chen, "Robust Cubature Kalman Filter for Dynamic State Estimation of Synchronous Machines Under Unknown Measurement Noise Statistics," in IEEE Access, vol. 7, pp. 29139-29148, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2900228.
13. Huang, Jian & Ma, Zhixun. (2023). Sensorless Control of Synchronous Reluctance Machines Based on Improved Kalman Filter-Phase Locked Loop. 4602-4605. 10.1109/ICEMS59686.2023.10344934.
14. Y. Li, M. Aït-Ahmed, N. Aït-Ahmed, W. Shi and Z. Zhou, "LQR Control Speed and Voltage of Synchronous Alternator," 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Changsha, China, 2010, pp. 617-620, doi: 10.1109/ICICTA.2010.503.
15. M. A. M. Cheema, J. E. Fletcher, D. Xiao and M. F. Rahman, "A Linear Quadratic Regulator-Based Optimal Direct Thrust Force Control of Linear Permanent-Magnet Synchronous Motor," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 5, pp. 2722-2733, May 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2519331.
16. R. Molavi, K. Shojaee and D. A. Khaburi, "Optimal vector control of permanent magnet synchronous motor," 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference, Johor Bahru, Malaysia, 2008, pp. 249-253, doi: 10.1109/PECON.2008.4762479.
17. F. R. Badal, S. K. Sarkar and S. K. Das, "High Performance ILQG Controller Design to Enhance Dynamic Stability of Multimachine Power System," 2018 4th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (iCEEICT), Dhaka, Bangladesh, 2018, pp. 142-147, doi: 10.1109/CEEICT.2018.8628063.
18. Обзор методов определения параметров моделей синхронных генераторов / А. С. Бердин, А. Н. Мойсейченко, П. Ю. Коваленко [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 103-111. – DOI 10.14529/power200412.

Авторы публикации

Фролов Михаил Юрьевич – канд. техн. наук, зав. кафедрой «Автоматизированных электроэнергетических систем» (АЭЭС) Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), г. Новосибирск, Россия. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0003-4408-0316>, *Email*: myu.frolov@gmail.com

References

1. D. Luenberger, "An introduction to observers," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 16, no. 6, pp. 596-602, December 1971, doi: 10.1109/TAC.1971.1099826
2. V. Radaisavljevic-Gajic and F. O. M. Safieh, "Discrete-Time Optimal Quadratic Performance Loss of a Linear Reduced Order Observer Based Controller Designed via a Sylvester Equation," 2024 4th International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Male, Maldives, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECCME62383.2024.10796489. P. V. S. Nag, C. S. Kumar, K. C. S. thampatty and T. B. Isha, "A modified approach for application of Augmented Extended Kalman filter for stator interturn fault diagnosis of a synchronous generator," 2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), Chennai, India, 2018, pp. 465-469, doi: 10.1109/ICEES.2018.8442354.
3. J. Carvalho, K. Datta and Yoopyo Hong, "A new block algorithm for full-rank solution of the Sylvester-observer equation," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 48, no. 12, pp. 2223-2228, Dec. 2003, doi: 10.1109/TAC.2003.820150.
4. K. -X. Cui and G. -R. Duan, "Adaptive Disturbance Observer Design for Discrete-Time High-Order Fully Actuated Systems Based on LMI and Its Application to Combined Spacecrafts," 2023 2nd Conference on Fully Actuated System Theory and Applications (CFASTA), Qingdao, China, 2023, pp. 12-17, doi: 10.1109/CFASTA57821.2023.10243313.
5. K. -X. Cui and G. -R. Duan, "Adaptive Disturbance Observer Design for Discrete-Time High-Order Fully Actuated Systems Based on LMI and Its Application to Combined Spacecrafts," 2023 2nd Conference on Fully Actuated System Theory and Applications (CFASTA), Qingdao, China, 2023, pp. 12-17, doi: 10.1109/CFASTA57821.2023.10243313
6. R. Molavi, K. Shojaee and D. A. Khaburi, "Optimal vector control of permanent magnet synchronous motor," 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference, Johor Bahru, Malaysia, 2008, pp. 249-253, doi: 10.1109/PECON.2008.4762479.
7. M. Ai, Y. Sun and X. Lv, "Dynamic state estimation for synchronous machines based on interpolation H_∞ extended Kalman filter," 2018 33rd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), Nanjing, China, 2018, pp. 555-559, doi: 10.1109/YAC.2018.8406436.
8. L. Peng, L. Xie, F. Wu and C. Li, "Field-oriented control of synchronous motor based on adaptive extended Kalman filter," 2011 IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems, Beijing, China, 2011, pp. 633-637, doi: 10.1109/CCIS.2011.6045146.
9. P. S. Madhukar and L. B. Prasad, "State Estimation using Extended Kalman Filter and Unscented Kalman Filter," 2020 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control and Computing (ICONC3), Lakshmangarh, India, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICONC345789.2020.9117536.
10. A. I. Ilieș, G. Chindriș and D. Pitiță, "A Comparison between State of Charge Estimation Methods: Extended Kalman Filter and Unscented Kalman Filter," 2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Pitesti, Romania, 2020, pp. 376-381, doi: 10.1109/SIITME50350.2020.9292232.
11. K. Kyslan, V. Šlapák, V. Petro, A. Marcinek and F. Ďurovský, "Speed Sensorless Control of PMSM with Unscented Kalman Filter and Initial Rotor Alignment," 2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE), The High Tatras, Slovakia, 2019, pp. 373-378, doi: 10.1109/EDPE.2019.8883918
12. Y. Li, J. Li, J. Qi and L. Chen, "Robust Cubature Kalman Filter for Dynamic State Estimation of Synchronous Machines Under Unknown Measurement Noise Statistics," in IEEE Access, vol. 7, pp. 29139-29148, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2900228.
13. Huang, Jian & Ma, Zhixun. (2023). Sensorless Control of Synchronous Reluctance Machines Based on Improved Kalman Filter-Phase Locked Loop. 4602-4605. 10.1109/ICEMS59686.2023.10344934.
14. Y. Li, M. Ait-Ahmed, N. Ait-Ahmed, W. Shi and Z. Zhou, "LQR Control Speed and Voltage of Synchronous Alternator," 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Changsha, China, 2010, pp. 617-620, doi: 10.1109/ICICTA.2010.503.
15. M. A. M. Cheema, J. E. Fletcher, D. Xiao and M. F. Rahman, "A Linear Quadratic Regulator-Based Optimal Direct Thrust Force Control of Linear Permanent-Magnet Synchronous Motor," in IEEE

Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 5, pp. 2722-2733, May 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2519331.

16. R. Molavi, K. Shojaei and D. A. Khaburi, "Optimal vector control of permanent magnet synchronous motor," 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference, Johor Bahru, Malaysia, 2008, pp. 249-253, doi: 10.1109/PECON.2008.4762479.

17. F. R. Badal, S. K. Sarkar and S. K. Das, "High Performance ILQG Controller Design to Enhance Dynamic Stability of Multimachine Power System," 2018 4th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (iCEEICT), Dhaka, Bangladesh, 2018, pp. 142-147, doi: 10.1109/CEEICT.2018.8628063.

18. Obzor metodov opredeleniya parametrov modelej sinhronnyh generatorov / A. S. Berdin, A. N. Mojsejchenkov, P. Yu. Kovalenko [i dr.] // Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika – 2020. – T. 20, № 4. – С. 103-111. – DOI 10.14529/power200412.

Authors of the publication

Mikhail Yu. Frolov – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0003-4408-0316>, Email: myu.frolov@gmail.com

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено 26.03.2025 г.

Отредактировано 10.08.2025 г.

Принято 12.08.2025 г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 621.357.12:62-622:621.039

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-4-104-122

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОЛИЗА ВОДЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАНИЯ АЭС С ВОДОРОДНЫМ КОМПЛЕКСОМ

Байрамов А.Н.^{1,2}, Макаров Д.А.^{1,2}, Седелкин В.М.²

¹Отдел энергетических проблем ФИЦ «Саратовский научный центр РАН», г. Саратов, Россия

²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия
art2198@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования комбинирования АЭС с водородным комплексом обосновывается необходимостью адаптации атомных станций к переменному энергопотреблению в течении суток в условиях их привлечения к регулированию неравномерности суточных графиков электрической нагрузки при сохранении базисной нагрузки. ЦЕЛЬ. Оценка термодинамической эффективности комбинирования АЭС с водородным комплексом для покрытия пиковой нагрузки в энергосистеме с учетом особенностей процесса электролиза воды под высоким давлением. МЕТОДЫ. На основе мирового опыта проанализирован механизм перекрестного проникновения водорода и кислорода, а также решения, направленные на предотвращение этого явления. Оценка термодинамической эффективности комбинирования АЭС с водородным комплексом выполнялась на основе математико-термодинамической модели развернутой тепловой схемы ПТУ АЭС с использованием формуляций IAPWS-IF97. РЕЗУЛЬТАТЫ. На основе обобщенного анализа авторами установлена и объяснена закономерность снижения КПД электролиза с ростом давления из-за явления перекрестного проникновения. Разработаны комплексные номограммы закономерности влияния рабочего давления на основные характеристики электролиза, в частности, КПД, удельный расход электроэнергии на производство водорода, рабочее напряжение на ячейке. Получено, что водородный комплекс на основе электролиза высокого давления оказывается эффективнее системы с использованием компрессоров по критериям преобразования провальной мощности в пиковую и КПД АЭС. ВЫВОДЫ. Авторами разработан и запатентован новый принцип комбинирования АЭС с водородным комплексом на основе электролиза воды высокого давления и показана его эффективность в условиях влияния перекрестного проникновения водорода и кислорода в сравнении с системой при использовании компрессорных машин в составе водородного комплекса.

Ключевые слова: атомная электростанция; водородный комплекс; электролиз воды высокого давления; взаимное проникновение газов; термодинамическая эффективность.

Для цитирования: Байрамов А.Н., Макаров Д.А., Седелкин В.М. Особенности электролиза воды высокого давления при оценке термодинамической эффективности комбинирования АЭС с водородным комплексом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 104-122. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-104-122.

FEATURES OF HIGH-PRESSURE WATER ELECTROLYSIS IN ASSESSING THE THERMODYNAMIC EFFICIENCY OF COMBINING NUCLEAR POWER PLANTS WITH A HYDROGEN COMPLEX

Bayramov A.N.^{1,2}, Makarov D.A.^{1,2}, Sedelkin V.M.²

¹Department of Energy Problems, Federal Research Center "Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Saratov, Russia

²Saratov State Technical University named after Y.A. Gagarin, Saratov, Russia
art2198@yandex.ru

Abstract: The RELEVANCE of the study of combining nuclear power plants with the hydrogen complex is substantiated by the need to adapt nuclear power plants to variable energy consumption during the day in the conditions of their involvement in regulating the unevenness of daily schedules of electric load while maintaining the basic load. PURPOSE. Assessment of the thermodynamic efficiency of combining a nuclear power plant with a hydrogen complex to cover the peak load in the power system, taking into account the features of the process of water electrolysis under high pressure. METHODS. Based on world experience, the mechanism of cross-penetration of hydrogen and oxygen, as well as solutions aimed at preventing this phenomenon, are analyzed. The assessment of the thermodynamic efficiency of combining NPPs with a hydrogen complex was carried out on the basis of a mathematical and thermodynamic model of the expanded thermal scheme of the NPP using the IAPWS-IF97 formulations. RESULTS. On the basis of the generalized analysis, the authors established and explained the regularity of the decrease in the efficiency of electrolysis with an increase in pressure due to the phenomenon of cross-penetration. Complex nomograms of the regularities of the influence of working pressure on the main characteristics of electrolysis, in particular, efficiency, specific consumption of electricity for hydrogen production, operating voltage on the cell, have been developed. It was obtained that the hydrogen complex based on high-pressure electrolysis turns out to be more efficient than the system using compressors in terms of the criteria for converting the using power into the peak power and the efficiency of the nuclear power plant. CONCLUSIONS. The authors have developed and patented a new principle of combining nuclear power plants with a hydrogen complex based on high-pressure water electrolysis and shown its efficiency under the influence of cross-penetration of hydrogen and oxygen in comparison with the system when using compressor machines as part of a hydrogen complex.

Keywords: nuclear power plant; hydrogen complex; high-pressure water electrolysis; mutual penetration of gases; thermodynamic efficiency.

For citation: Bayramov A.N., Makarov D.A., Sedelkin V.M. Features of high-pressure water electrolysis in assessing the thermodynamic efficiency of combining nuclear power plants with a hydrogen complex. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (4): 104-122. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-104-122.

Введение (Introduction)

Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года [1], отражает актуальность и перспективность проводимых исследований, связанных с водородной энергетикой. В условиях мировой парадигмы о декарбонизации это задает характерный вектор разработок водородных технологий с учетом растущего значения целесообразности производства чистого («зеленого») водорода за счет возобновляемых источников энергии и АЭС безуглеродными методами, одним из которых является электролиз воды.

На сегодняшний день в различных научно-исследовательских организациях и научно-производственных объединениях в ряде стран мира, таких как Россия, США, Канада, Франция, Испания, Голландия, Чехия, Турция, Швейцария, Испания, Индия, Индонезия, Австрия, Южная Корея, ЮАР, Китай и Япония, ведутся работы по всестороннему совершенствованию получения водорода методом электролиза воды. Среди решаемых проблем [2]: поиск эффективных катализаторов как альтернатива металлов платиновой группы; новые технологии создания электродов и разделительных мембран; новые технологии электролиза; применение специальных активационных добавок в электролит, а также новых химических составов электролитов; повышение рабочего давления электролиза; применение магнитного поля; математическое моделирование и оптимизация затрат процесса электролиза; разработка интеллектуальных систем управления процессом электролиза; вопросы безопасности, надежности и долговечности; вопросы чистоты водорода; проблемы высокотемпературного электролиза пара.

Цель исследования заключается в проведении обобщенного и подробного анализа проблемы совершенствования электролиза воды за счет повышения рабочего давления на основе мировой практики.

Научная и практическая значимость работы обусловлена проблемой обеспечения АЭС базисной нагрузкой в условиях увеличения их доли в энергосистемах и привлечения к участию в регулировании суточной неравномерности электрической нагрузки в диапазоне до 50% от номинальной мощности [1]. Одним из перспективных решений является

комбинирование АЭС с водородным комплексом как средство обеспечения АЭС базисной нагрузкой. Авторами разработана новая концепция комбинирования АЭС с водородным комплексом на основе электролиза воды высокого давления без использования компрессорных машин до и после системы хранения водорода и кислорода [3], что является более надежным по критерию вероятности безотказной работы водородного комплекса в целом по сравнению с вариантом при использовании компрессорных машин [4].

К настоящему времени имеются научные основы по проблеме комбинирования АЭС с водородным комплексом, в частности, известны принципы, повышающие безопасность использования водорода в паротурбинном цикле АЭС, в том числе с реализацией подземного размещения основного оборудования и применения рекомбинаторов и устройств магнитной сепарации непрореагировавшего водорода. Существенный вклад в исследуемую теорию комбинирования вносят оценка снижения рисков, связанных со взрывом и пожаром гремучей смеси, и анализ рабочего ресурса используемого оборудования [5, 6].

На рисунке 1 приведены принципиальные схемы комбинирования АЭС с водородным комплексом с использованием компрессорных машин [5, 6] и высокого давления [3].

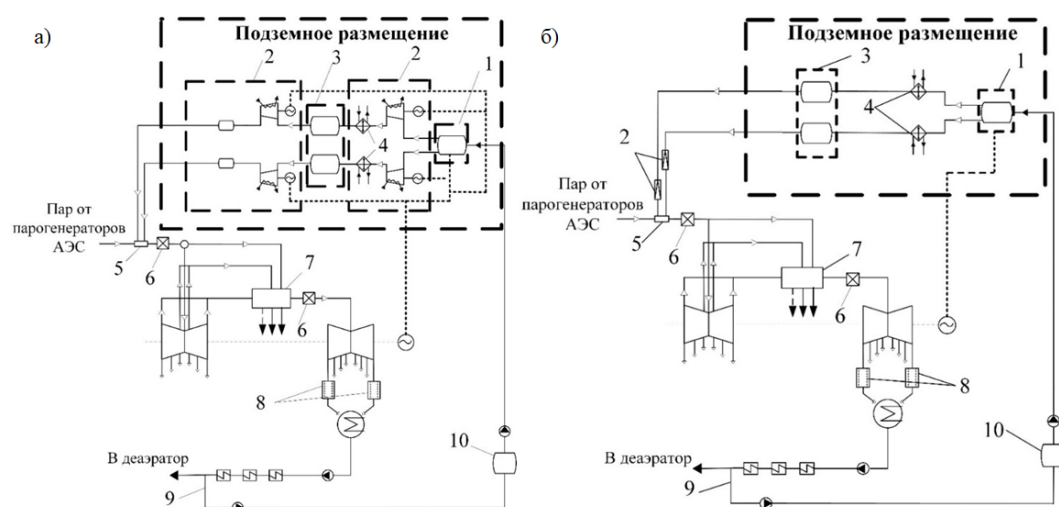


Рис. 1. Принципиальные схемы комбинирования АЭС с водородным комплексом: а) с использованием компрессорных установок; б) высокого давления; 1 – система электролизеров; 2 (а) – система компримирования водорода и кислорода; 2 (б) – система редукционных установок; 3 – емкостная система хранения водорода и кислорода; 4 – охлаждающие теплообменники; 5 – водород-кислородная камера сгорания; 6 – каталитический рекомбинатор; 7 – сепаратор-пароперегреватель; 8 – устройство магнитной сепарации непрореагировавшего водорода; 9 – рециркуляция добавленного рабочего тела; 10 – бак-аккумулятор

Fig. 1. Schematic diagrams of combining NPPs with a hydrogen complex: a) using compressor units; b) high pressure; 1 – electrolyzer system; 2 (a) – hydrogen and oxygen compression system; 2 (b) – system of reducing devices; 3 – capacitive hydrogen and oxygen storage system; 4 – cooling heat exchangers; 5 – hydrogen-oxygen combustion chamber; 6 – catalytic recombiner; 7 – separator-superheater; 8 – device for magnetic separation of unreacted hydrogen; 9 – recirculation of the added working fluid; 10 – accumulator tank

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

Принцип работы водородного комплекса с использованием компрессоров (а) и высокого давления (б):

а) В часы разгрузки невостребованная мощность преобразуется в системе электролизеров в водород и кислород, которые при помощи компрессоров запасаются в системе хранения на основе цилиндрических емкостей со сферическими днищами под невысоким давлением. В пиковые часы электрической нагрузки при помощи дожимных компрессорных установок водород и кислород отбираются из системы хранения для выработки пиковой мощности за счет сжигания в системе водород-кислородных камер сгорания с целью перегрева рабочего тела ПТУ АЭС и выработки пиковой мощности. При этом нагрузка реактора и парогенераторов не изменяется в течение суток.

б) В провальные часы неостребованная электроэнергия потребляется электролизерами с выработкой водорода и кислорода под высоким давлением, которые аккумулируются в системе хранения на основе емкостей из композитного материала высокой прочности. В период пиковых нагрузок в энергосистеме производится подача водорода и кислорода в систему сжигания водород-кислородных камер сгорания с целью перегрева рабочего тела ПТУ АЭС и выработки пиковой мощности. Подача водорода и кислорода осуществляется посредством системы редукционных установок с целью выравнивания давления с давлением свежего пара во избежание гидроудара турбины.

На сегодняшний день мировым научным сообществом все активнее проводятся работы в области электролиза воды, в том числе с реализацией высокого давления. Повышенный интерес к исследуемому способу получения газообразного водорода характеризуется необходимостью создания эффективного средства аккумулирования энергии, а также потребностью снижения выбросов углекислого газа при производстве водорода.

Более подробное описание принципа действия, в том числе необходимое количество основного и резервного оборудования водородного комплекса на основе электролиза воды высокого давления приведено в работе [4].

Литературный обзор (Literature Review)

Основы технологии электролизеров с протонообменной мембраной

Ряд современных исследований электролизеров для производства водорода сосредоточены на технологии использования протонообменной мембраны, поскольку, в сравнении с щелочным типом, РЕМ-электролизер представляется более перспективной технологией благодаря устойчивости к большим плотностям тока и высокой достигаемой чистоте вырабатываемых газов. Кроме того, образующийся водород может находиться под давлением в ходе электролиза благодаря низкой газопроницаемости и высокой механической стойкости мембраны [7].

Таким образом, водород под высоким давлением возможно производить непосредственно в электролизере, а не сжимать механическими компрессорами [8].

Протонообменные мембраны обладают рядом физических свойств, необходимых для работы в электролизерах воды РЕМ: высокая ионная проводимость, низкая электронная проводимость, химическая и механическая стабильность, долговечность, высокая теплопроводность и ограниченная проницаемость для водорода и кислорода [9-14].

Ячейка электролизера с протонообменной мембраной ограничена двумя концевыми пластинами, изготовленными из титана. Структура мембраны и электрода, принятая в РЕМ-электролизерах, тоньше и прочнее, чем у сепарационного устройства щелочного электролизера, что обеспечивает меньшее омическое сопротивление, более высокую плотность тока и способность выдерживать большую разницу давлений между отсеками ячейки.

В РЕМ-электролизерах образующиеся газообразные водород и кислород накапливаются в катодном и анодном отсеках, соответственно, и, если рабочее давление установлено выше атмосферного, то отводятся в резервуар для хранения при достижении необходимого давления [15, 16].

Схематическое изображение ячейки электролизера с протонообменной мембраной представлено на рисунке 2.

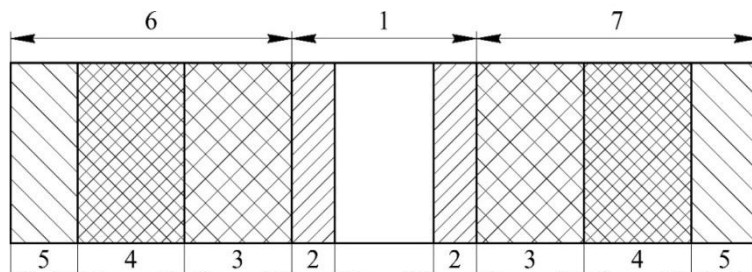


Рис. 2. Схематическое изображение ячейки

электролизера с протонообменной мембраной: 1 – мембранная электродная сборка; 2 – слой катализаторов; 3 – пористые транспортные слои; 4 – прокладки и ограничители потока; 5 – концевые пластины-токоприемники; 6 – катодный отсек; 7 – анодный отсек

Fig. 2. Schematic representation of an electrolyzer cell with a proton exchange membrane: 1 – membrane electrode assembly; 2 – catalyst layers; 3 – porous transport layers; 4 – gaskets and flow limiters; 5 – end plates-pantographs; 6 – cathodic compartment; 7 – anode compartment

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

Реализации высокого давления способствует использование армированной твердополимерной мембраны, работающей при высоких перепадах давления между анодным и катодным отсеками. Необходимо упомянуть тот факт, что эффективность электролиза в таком случае несколько снижается из-за увеличения омического сопротивления мембраны [15].

Напряжение, необходимое для электрохимического разложения воды в ячейке электролизера под давлением, описывается уравнением Нернста [7]:

$$U = E_a - E_k = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} S_{H_2} \sqrt{p_{O_2} S_{O_2}}}{\sqrt{c_0^3}} \right)$$

где E_a, E_k – электрические потенциалы на аноде и катоде соответственно, В; E_0 – электрический потенциал, соответствующий обратимому напряжению разложения воды в стандартных условиях, В; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура, К; F – постоянная Фарадея, Кл/моль; p_{H_2}, p_{O_2} – парциальное давление водорода и кислорода соответственно, бар; S_{H_2}, S_{O_2} – растворимости водорода и кислорода соответственно, моль/(см³·бар); c_0 – стандартная эталонная концентрация водорода и кислорода в воде, моль/л.

Растворимость газа в мембране связывает коэффициент диффузии, проницаемость, а также парциальное давление и концентрацию по закону Генри, характеризующего пропорциональную зависимость между концентрациями растворенных газов и их парциальными давлениями [7]:

$$c = pS = p \frac{\varepsilon}{D}$$

где D – коэффициент диффузии газа, см²/с; ε – проницаемость мембраны, моль/(с·см·бар).

Из представленных уравнений очевидно, что рост давления способствует увеличению растворимости водорода и кислорода, что будет снижать выход по току – отношение количества газа (водорода или кислорода) практически полученного в ячейке электролизера к количеству газа, которое должно образоваться при полном использовании тока [17]. При нормальной работе значение выхода по току составляет 98 %. Таким образом, с целью компенсации снижения выхода по току необходимо увеличение удельного расхода электроэнергии по мере роста давления.

Принципы обеспечения высокого давления электролиза

В ходе комплексного анализа работ, посвященных электролизу воды с использованием протонообменной мембраны, в том числе [15, 18], возможно выделить три способа обеспечения высокого давления вырабатываемого водорода:

1) деионизированная вода при атмосферном давлении подается непосредственно в анодный отсек электролизера, электролиз производится при атмосферном давлении. На аноде вырабатывается кислород. Водород, образующийся на катодной стороне ячейки, подается на механическое многоступенчатое компримирование для нагнетания давления необходимого значения;

2) деионизированная вода подается в анодный отсек за счет насоса высокого давления для обеспечения необходимого давления вырабатываемых в процессе электролиза газов, равного давлению исходной воды. Такой тип работы электролизной установки называется сбалансированным или симметричным;

3) деионизированная вода поступает в электролизер на анодной отсек при атмосферном давлении. На катодной стороне, за счет непроницаемости мембраны, генерируется с постепенным повышением давления водород, что избавляет от необходимости подавать воду под давлением и исключает внедрение компрессорных машин. Данный тип работы электролизера называется дифференциальным или асимметричным, разность давлений между отсеками ячейки ограничена способностью мембраны противостоять возникающим механическим напряжениям [19, 20].

Стоит отметить, что в первом и третьем способах давление кислорода поддерживается в условиях атмосферного.

Принципиальные схемы электролизных установок высокого давления, основанные на данных патентов на изобретение [21, 22], по второму и третьему способам нагнетания отражены на рисунках 3 и 4 соответственно.

К заполненному водой блоку электролизных ячеек 1 подается напряжение постоянного тока – организуется процесс электролиза воды, при котором на анодах выделяется кислород, а на катодах – водород. Образующиеся газы вместе с уносимой частью воды отводятся в газоотделители водорода 2 и кислорода 3, где происходит механическое отделение газов от воды. Через патрубки 4 и 5 реализуется отвод водорода и кислорода соответственно в емкостную систему хранения высокого давления. Из

газоотделителей вода через краны-регуляторы 6 дросселируется до давления, близкого к атмосферному, в сепаратор 7, где из нее выделяются растворенные водород и кислород, удаляемые через краны газовой продувки 8 с использованием нейтрального газа – аргона или азота. Для компенсации разложившейся в электролизере воды в сепаратор 7 необходимо добавлять воду из емкости 10 с помощью насоса 11. Предварительно добавочная вода подводится в емкость 10 через патрубок 9. Из сепаратора 7 воды подается насосом высокого давления 12 на электролиз. Конструкционно блок ячеек находится в герметичном кожухе, который расположен в жестком корпусе электролизера. С целью выравнивания давления между электролизными ячейками осуществляется подача жидкости противодавления из емкости 13 насосом высокого давления 14 во внутренний объем жесткого корпуса установки. Давление жидкости поддерживается эквивалентным рабочему давлению процесса электролиза.

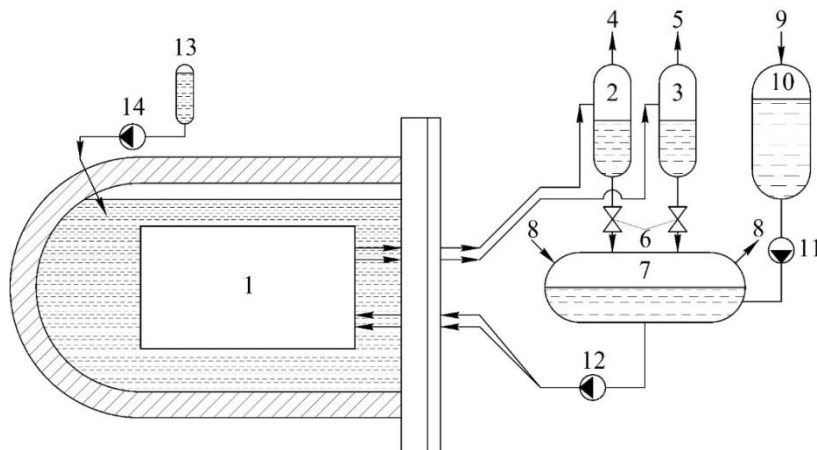


Рис. 3. Принципиальная схема электролизной установки высокого давления сбалансированного типа: 1 – блок электролизных ячеек в герметичном кожухе; 2, 3 – газоотделители водорода и кислорода соответственно; 4, 5 – отвод газообразных водорода и кислорода соответственно; 6 – краны-регуляторы; 7 – сепаратор деионизированной воды; 8 – газовая продувка; 9 – подвод воды; 10 – емкость с водой; 11 – водяной насос; 12, 14 – насосы высокого давления деионизированной воды и жидкости противодавления соответственно; 13 – емкость с жидкостью противодавления

Fig. 3. Schematic diagram of a high-pressure electrolysis unit of balanced type: 1 – block of electrolysis cells in a sealed casing; 2, 3 – hydrogen and oxygen gas separators, respectively; 4, 5 – removal of gaseous hydrogen and oxygen, respectively; 6 – regulator valves; 7 – deionized water separator; 8 – gas purging; 9 – water supply; 10 – container with water; 11 – water pump; 12, 14 – high-pressure pumps of deionized water and back-pressure fluid, respectively; 13 – container with back-pressure fluid

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

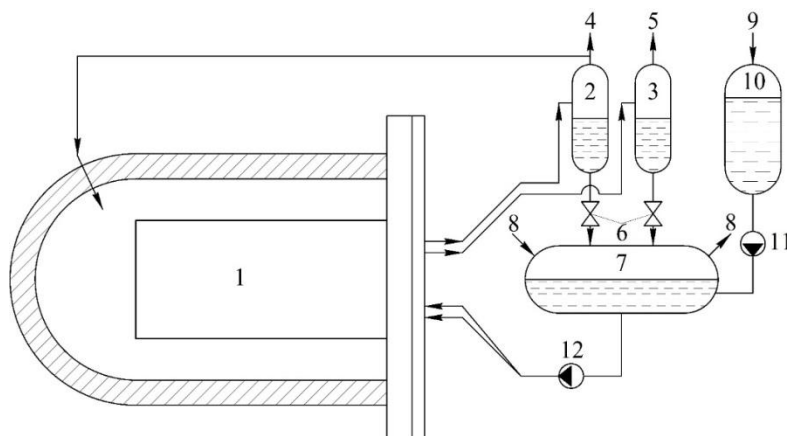


Рис. 4. Принципиальная схема электролизной установки высокого давления дифференциального типа: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 – то же, что на рис. 3; 12 – насос подачи деионизированной воды в блок электролизных ячеек

Fig. 4. Schematic diagram of a differential type high-pressure electrolysis unit: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 – the same as in Fig. 3; 12 – pump for feeding deionized water into the electrolysis cell unit

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

Представленный на рисунке 4 вариант электролизной установки высокого давления отличается от электролизера со сбалансированным давлением тем, что воды подается насосом 12 в анодный отсек блока электролизных ячеек с давлением, равным атмосферному.

Водород вырабатывается в процессе электролиза при давлении, которое может превышать уровень давления в корпусе, поэтому не требуется промежуточного сжатия газа для нагнетания давления в корпусе. По меньшей мере часть водорода, получаемого под давлением из пакета ячеек, используется для создания давления внутри жесткого корпуса высокого давления.

Использование в качестве создающей давление среды самого газа, вырабатываемого в процессе электролиза, имеет следующие преимущества:

- 1) не требуется дополнительных компрессорных установок и насосов высокого давления;
- 2) с момента начала процесса электролиза при низком давлении вплоть до конечного рабочего давления повышение давления газа в корпусе высокого давления электролизера происходит пропорционально нарастанию давления процесса электролиза;
- 3) обеспечивается электрическая газовая изоляция и снижается риск потерь мощности или короткого замыкания, вызванных утечкой воды.

При дифференциальном типе работы РЕМ-электролизера высокое давление поддерживается на катодной стороне, где производится выработка водорода, анодная же сторона находится под атмосферным. В таком случае, в результате повышения рабочего давления только на катодной стороне, создается риск, связанный с опасностью нарушения герметичности мембраны, что вызовет образование гремучей смеси.

Сбалансированный тип работы электролизной установки характеризуется равным давлением как со стороны катода, так и со стороны анода. Мембрана, прокладки и пористый транспортный слой имеют меньшую толщину с учетом более низких требований к механической прочности при сравнении с дифференциальным типом, так как нагрузки, оказываемые с катодной и анодной стороны, уравниваются друг друга.

Первый способ нагнетания давления вырабатываемого водорода имеет недостаток за счет сжатия в многоступенчатых компрессорных установках и связанных с этим больших затрат энергии.

Отрицательной характеристикой второго механизма нагнетания высокого давления является потребность в дополнительной энергии, необходимой для генерации кислорода при повышенном давлении.

При увеличении давления производимого водорода с использованием третьего механизма характерное влияние на эффективность и производительность электролизера оказывает явление перекрестного проникновения газов, увеличивающее общую удельную потребность в энергии, согласно уравнению Нэрнста [18].

В настоящей работе особо приняты во внимание исследования, в которых рассматриваются физико-химические явления и проблемы, связанные с повышением давления электролиза.

Одним из таких процессов является перекрестное проникновение, т.е., взаимное проникновение водорода и кислорода через мембрану. Это явление зависит от разницы парциального давления между каналами потока на катодной и анодной стороне, а также от растворимости и диффузии через мембрану. При этом проникновение водорода более вероятно вследствие более высокой диффузионной способности [23].

Кроме того, молекулы воды гидратируют ионы и переносятся через мембрану (электроосмос [24, 25]), что приводит к рекомбинации кислорода и водорода на поверхности электрода и снижает выход по току [15].

В работах [14, 26, 27] показано, что разница давлений между катодным и анодным отсеками создает диффузионный градиент. Скорость перекрестного проникновения газов через мембрану и их растворимость в воде увеличиваются с повышением давления, в результате чего растет концентрация водорода и кислорода в анодном и катодном отсеках соответственно, что может привести к образованию взрывоопасной смеси.

В исследовании [23] анализируется одномерная динамическая модель системы электролиза воды высокого давления, по результатам расчета которой получены объемные доли водорода на анодной стороне ячейки в зависимости от катодного давления, имеющего значения 3, 30 и 100 бар, а также проанализировано влияние плотности тока на объемное содержание водорода при постоянном давлении 100 бар. Для 3 и 30 бар объемная доля водорода не превышает 0,5%, в то время как для 100 бар она изменяется в диапазоне 2,5...3%. При средних плотностях тока со значениями 0,7, 1 и 1,3 А/см² объемное

содержание водорода не достигает взрывоопасного предела, но при плотности тока, равной $0,4 \text{ Асм}^{-2}$, это предел превышен в среднем в 1,5 раза.

Исходя из данных работы [7] известно, что в результате моделирования содержание водорода в анодном отсеке ячейки электролизера при сбалансированном давлении 30 бар и дифференциальном давлении, где на катодной стороне реализуется 30 бар, а на анодной – 1 бар, в зависимости от плотности тока и толщины мембраны в диапазонах до 2 А/см^2 и 50...300 мкм, соответственно, получены следующие сведения: при любой плотности тока объемное содержание водорода на анодной стороне электролизера с толщиной мембраны 50 мкм составляет более 5%, для мембран с толщинами 100 и 150 мкм при сбалансированном давлении содержание водорода менее 4% наблюдается в диапазоне $1,5...2 \text{ А/см}^2$, тогда как при дифференциальном давлении такой результат достигается при 2 А/см^2 . Объемное содержание водорода ниже 4% для мембран с толщинами в диапазоне 200...300 мкм достигается при сбалансированном давлении при плотностях тока от $0,75 \text{ А/см}^2$, при дифференциальном давлении плотности тока составляют от 1 А/см^2 . По оценкам проведенной работы [7], при сбалансированном давлении перекрестное проникновение водорода примерно на треть меньше по сравнению с дифференциальным давлением.

По данным работы [26], на электроосмотический перенос воды существенно влияет только плотность тока. Потери электроэнергии в ячейках оказываются относительно небольшими при низких плотностях тока, поэтому КПД системы снижается при высоких ее значениях. С другой стороны, низкая плотность тока нецелесообразна, поскольку скорость производства водорода на ячейке будет относительно низкой [16]. Процесс электролиза при высоком давлении, слабом токе и низкой скорости подачи воды увеличивает концентрацию водорода в анодном канале и может быть опасным. Резкие изменения рабочих параметров, такие как снижение плотности тока или увеличение расхода воды, могут привести к росту концентрации водорода в анодном отсеке ячейки [23].

Поскольку проникающая способность у водорода больше, чем у кислорода, то риск возникновения гремучей смеси в анодном отсеке наиболее высок. Для предотвращения таких рисков предложены следующие методы:

- химическая модификация перфторированной твердополимерной мембраны посредством использования цирконилфосфата или полиэфиркетонов в качестве добавочного компонента для уменьшения явления перекрестного проникновения, движущей силой которого является разница химического потенциала между анодным и катодным отсеками ячейки. Внедряемые добавочные компоненты используются вследствие их высокой химической и термической стабильности, механической прочности. Вне зависимости от метода сульфирования всегда необходима оптимизация содержания сульфогрупп в полимере, поскольку, с одной стороны, увеличение их количества повышает протонную проводимость мембраны, но, с другой стороны, увеличивает растворимость полимера в воде и степень набухания мембраны, что ухудшает ее механические характеристики [28];

- внедрение каталитических газовых рекомбинаторов для поддержания концентраций водорода и кислорода на анодном и катодном участках ячейки соответственно в значениях, совместимых с требованиями безопасности. Такое решение способствует гетерогенной рекомбинации газообразных водорода и кислорода на поверхности катализаторов. Каталитический рекомбинатор может быть размещен снаружи, в пористом транспортном слое, в слое катализатора или в мембране [29]. Известно, что при использовании внешнего рекомбинатора необходимо предварительно высушить газ, что характеризует трудности в исполнении такого метода. Предложено внедрение внутреннего каталитического рекомбинатора, представленного прослойкой из наночастиц платины, вводимых в электролизер посредством напыления. Содержание водорода в кислороде в анодном отсеке значительно снижается при внедрении рекомбинационной прослойки в МЭС по сравнению со стандартными МЭС без прослойки. За 245 часов выявлено лишь незначительное увеличение содержания водорода в кислороде – ниже $140 \cdot 10^{-6} \text{ об.}\% \cdot \text{ч}^{-1}$, тогда как для стандартных МЭС наблюдалось более сильное увеличение – выше $1250 \cdot 10^{-6} \text{ об.}\% \cdot \text{ч}^{-1}$. Более того, долгосрочные эксперименты не показали увеличения скорости разложения мембраны с прослойкой по сравнению со стандартной мембраной [29];

- утолщение твердополимерной мембраны – скорость проникновения водорода быстро увеличивается с ростом катодного давления, что можно уменьшить за счет увеличения толщины мембраны [8], в результате чего при высоких давлениях водорода во время электролиза наблюдаются меньшие его концентрации в анодном отсеке. Однако более толстые мембраны имеют повышенное омическое сопротивление, что снижает эффективность электролиза по напряжению [7]. То есть увеличение давления газа внутри

отсека ячейки приводит к росту потребления энергии во время электролиза. Такое снижение эффективности частично компенсируется уменьшением размеров газовых пузырьков и снижением газовых экранирующих эффектов на поверхности электродов, что в противном случае увеличивало бы сопротивление воды и ограничило бы плотность тока [7]. Отсюда следует, что на энергопотребление электролизера высокого давления характерно влияет толщина мембраны.

Современные достижения в области разработок и испытаний различных прототипов PEM-электролизеров высокого давления

Среди последних разработок в области электролиза воды высокого давления известна работа [30], в которой была разработана динамическая модель электролизера с протонообменной мембраной дифференциального типа с высоким катодным рабочим давлением в условиях калибровки по экспериментальным данным, полученным на PEM-электролизере (PEM – proton-exchange membrane) мощностью 5,6 кВт. Результаты показали сходимость расчетных и эмпирических данных при росте давления процесса до 70 бар.

В работе [31] проведена технико-экономическая оценка систем электролиза воды высокого давления в диапазоне 70...80 бар с использованием протонообменной мембраны и в условиях сравнения с системами, работающими при 30 бар с применением компримирования. Приведенные результаты свидетельствуют возможности достижения экономической целесообразности использования электролизеров систем PEMEL высокого давления, работающих на высоком и сверхвысоком давлениях, отвечающих требованиям существующих и будущих промышленных предприятий.

В работе [32] изучено явление перекрестного проникновения газов сквозь твердополимерную мембрану в PEM-электролизерах высокого давления, поскольку оно воздействует на энергопотребление и безопасность эксплуатации установки. Также необходимы измерения перехода водорода при фактических рабочих температурах и давлении. Рабочие давления составляют 11,3 и 0,1 МПа на катодной и анодной стороне соответственно. При плотности тока 0,4 А/см² была оценена деградация поверхности электродов до и после экспериментов с высоким давлением. В качестве результатов получено, что необратимая пластическая деформация и возможная адсорбция примесей на поверхности слоя анодного катализатора приводят к значительному ухудшению производительности.

В мировой практике имеется реальный опыт испытаний различных прототипов PEM-электролизеров высокого давления.

В ходе проекта GenHyPEM, исследовательской программы по изучению электролиза воды под высоким давлением с использованием твердополимерной протонообменной мембраны, проводились эксперименты с использованием электролизной установки высокого давления, предназначенной для работы в условиях диапазона давлений до 130 бар при температурах до 90 °С. Электролизер GenHy1000, созданный в рамках проекта GenHyPEM, расположен в Парижском университете. Насосы высокого давления используются для нагнетания и циркуляции воды как в анодном, так и в катодном отсеках. Получены значения чистоты водорода и выхода по току, показывающие, что уровень загрязнения водорода кислородом может быть значительно высоким, даже при использовании толстых мембран. Результаты показали, что объемное содержание кислорода в водороде при давлении 130 бар может достигать 2,66 об.%, что находится ниже предела воспламеняемости водород-кислородных смесей, но даже в этих условиях необходимо обеспечивать меры безопасности для предотвращения аварийных ситуаций [33].

Построенный и введенный в эксплуатацию в Австрии электролизер Wind2Hydrogen спроектирован как модульный дифференциальный PEM-электролизер воды высокого давления мощностью более 100 кВт, оснащен двенадцатью отдельными управляемыми модулями производства Fronius International GmbH. На основе экспериментальных исследований на модуле мощностью 9,6 кВт определены эмпирические параметры, измерения проводились при давлениях в диапазоне 70...155 бар и температурах 45...75 °С с плотностями тока 0,81...1,85 А/см². Проанализированы эффективность ячейки и диффузия водорода от катода к аноду. КПД электролизной ячейки, равный 74,8%, был достигнут при параметрах 0,81 А/см², 75 °С и 155 бар. Получено, что эффективность ячейки и общий КПД уменьшаются с увеличением давления, снижение температуры на 30 °С снижает эффективность больше, чем увеличение давления с 70 до 155 бар [26].

Прототип электролизера высокого давления в работе [20] был изготовлен компанией Giner Inc., испытания проводились в рамках итальянского проекта FISIR. Особенностью прототипа является дифференциальное давление на мембране: в анодных отсеках

поддерживается атмосферное давление, а в катодных оно достигает 7 МПа. Испытания проводились при 7 различных давлениях в диапазоне 1...7 МПа, и температурах 40, 48 и 55 °С. Получено, что повышение температуры от 40 °С до 55 °С приводит к снижению напряжения на 70 мВ при давлении 1 МПа и на 100 мВ при давлении 7 МПа, увеличение давления с 1 до 7 МПа вызывает повышение напряжения на 130 мВ при температуре 40°С и на 100 мВ при 55°С.

В России наибольших успехов в исследовании процессов электролиза и создании электролизеров с твердополимерной мембраной достигли в НИЦ «Курчатовский институт» в кооперации с ФГУП «Красная Звезда» и НИУ «МЭИ»: разработаны электролизные установки с производительностью до 10 нм³/ч, организовано мелкосерийное производство некоторых типов электролизеров различного назначения. Установки электролиза высокого давления, разработанные НИЦ «Курчатовский институт» возможно использовать для зарядки газовых баллонов с эксплуатационным давлением до 200 бар, что позволяет исключить наиболее энергоемкую первую ступень сжатия газа в многоступенчатых механических водородных компрессорах [34].

Коммерчески доступные крупномасштабные системы электролиза на мировом рынке представлены компаниями Siemens – Германия, NEL – Норвегия, Proton Onsite и Giner – США, Hydrogenics – Канада, ITM-Power – Великобритания, AREVAH2Gen – Франция [15].

В работе [35] отмечается, что с ростом рабочего давления процесса электролиза увеличивается давление производимого водорода (и кислорода), что позволяет отказаться от многоступенчатого сжатия в компрессорных установках, требующих значительных затрат электроэнергии, что отражает перспективность подхода с точки зрения снижения стоимости вырабатываемого водорода. Такое решение позволяет повысить общую эффективность водородного комплекса.

Для щелочных электролизеров рабочие давления свыше 100...200 бар менее распространены, чем для PEM-электролизеров, но разработка такого оборудования активно ведется в том числе вследствие допустимости температур более 200°С, что, в свою очередь, позволяет достигать высоких значений КПД в условиях отсутствия деградации селективной мембраны. В работе [36] представлено аналитическое изучение влияния температуры и давления на щелочной электролиз. Отмечается, что при повышении температуры или давления обратимое напряжение электролиза уменьшается, при этом перенапряжение снижается с повышением температуры и практически не зависит от давления. В условиях теоретической оценки КПД электролиза при 350 °С и 100 бар увеличивается примерно на 17% в сравнении со значением КПД при 80 °С и 1 бар.

Методические положения оценки эффективности комбинирования АЭС с водородным комплексом на основе электролиза воды высокого давления

Выявленные факторы необходимо принять во внимание при разработке и обосновании водородного комплекса высокого давления в комбинировании с АЭС с точки зрения безопасности работы электролизной установки. Приведенный подробный анализ исследуемых работ позволяет основательно подойти к оценке зависимостей рабочих параметров процесса электролиза с учетом явления перекрестного проникновения.

Как было отмечено выше, с ростом рабочего давления КПД электролиза уменьшается вследствие снижения выхода по току за счет интенсификации явления перекрестного проникновения газов сквозь твердополимерную мембрану. Это приводит к некоторому снижению количества вырабатываемого водорода и кислорода, что в итоге вызывает соответствующее некоторое снижение относительного внутреннего КПД турбины по сравнению с вариантом при использовании компрессорных машин. В дальнейших расчетах принимается среднее значение КПД электролиза высокого давления с учетом влияния инерционности процесса снижения выхода по току.

В этих условиях целесообразно произвести оценку влияния исследуемого явления перекрестного проникновения газов на термодинамическую эффективность комбинирования АЭС с водородным комплексом высокого давления с точки зрения преобразования провальной мощности в пиковую и итогового значения КПД АЭС брутто при реализации перегрева свежего пара на входе в голову турбины, в том числе в условиях сравнения с системой водородного комплекса с использованием компрессорных машин.

Главным преимуществом схемы на рисунке 1б является существенное увеличение вероятности безотказной работы водородного комплекса в целом, а также, по итогам выполненных оценок, стоимость резерва для водородного комплекса высокого давления оказывается относительно меньшей [4].

На примере комбинирования АЭС с ВВЭР-1200 с водородным комплексом на основе электролиза воды высокого давления выполнена сравнительная оценка эффективности

преобразования провальной мощности в пиковую на основании математико-термодинамической модели развернутой тепловой схемы ПТУ АЭС [37] согласно рисунку 16.

Коэффициент эффективности преобразования в пиковую мощность оценивался по выражению:

$$\eta_{\text{пров}1k} = \eta_{\text{эу}}(1 - \alpha)\eta_{\text{компр}1}\eta_{\text{компр}2}\eta_{oi}\eta_{\text{эг}}\eta_{\text{мех}},$$

$$\eta_{\text{пров}2j,k} = \eta_{\text{эу}j}(1 - \alpha)\psi\eta_{oi}\eta_{\text{эг}}\eta_{\text{мех}},$$

при этом

$$\eta_{\text{эу}j} = 71,736 - 1,995 \ln p_j,$$

где $\eta_{\text{пров}1k}$, $\eta_{\text{пров}2j,k}$ – коэффициент эффективности преобразования провальной мощности в пиковую (КЭП) для водородного комплекса с использованием компрессорных установок и высокого давления соответственно; k, j – в зависимости от величины используемой провальной мощности и рабочего давления процесса электролиза, соответственно; $\eta_{\text{эу}}$, $\eta_{\text{эу}j}$ – КПД электролизной установки для водородного комплекса с компрессорными машинами и высокого давления, полученное на основании номограммы на рисунке 5, соответственно; p_j – рабочее давление процесса электролиза; η_{oi} – относительный внутренний КПД турбины К-1200-6,8/3000 с учетом перегрева свежего пара; $\eta_{\text{компр}1}$, $\eta_{\text{компр}2}$ – КПД газового поршневого компрессора при зарядке и разрядке соответственно; $\eta_{\text{эг}}$ – КПД электрогенератора; $\eta_{\text{мех}}$ – КПД механической передачи турбоагрегата; α – коэффициент учета затрат мощности на собственные нужды электролизной установки (принят равным 5%); ψ – коэффициент учета потерь полезной мощности в цикле в результате дросселирования.

Отношение выработанной пиковой электроэнергии АЭС нетто с использованием паро-водородного перегрева к потребляемой провальной электроэнергии для выработки водорода и кислорода характеризует коэффициент преобразования провальной мощности в пиковую:

$$\eta_{\text{пров}} = \frac{N_{\text{АЭС(н)}}^{\text{пик}} \tau_{\text{пик}}}{N_{\text{пров}} \tau_{\text{пров}}},$$

где $N_{\text{АЭС(н)}}^{\text{пик}}$ – пиковая мощность АЭС нетто (за вычетом электрической мощности компрессорных машин); МВт; $\tau_{\text{пик}}$, $\tau_{\text{пров}}$ – период пика и периода провала электрической нагрузки, соответственно, в энергосистеме, ч/сут; $N_{\text{пров}}$ – используемая провальная мощность, МВт.

На основании имеющихся данных, а также при использовании программного обеспечения [37], были получены значения КПД АЭС брутто для исследуемых водородных комплексов в условиях дифференцирования по провальной мощности. Определение КПД АЭС брутто производится в соответствии со следующей формулой:

$$\eta_{\text{АЭС}}^{\text{бр}} = \frac{N_{\text{АЭС}+Q_{\text{H}_2}}}{Q_{\text{p}} + Q_{\text{H}_2}},$$

где $N_{\text{АЭС}+Q_{\text{H}_2}}$ – электрическая мощность энергоблока АЭС с учетом подведенной теплоты водорода в паротурбинном цикле, МВт; Q_{p} – тепловая мощность реактора в номинальном режиме, МВт; Q_{H_2} – теплота, подведенная при сжигании водорода в среде кислорода, МВт.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Исходя из анализа представленных данных по источникам [7, 8, 14-16, 18, 20, 23, 26, 27, 33, 36, 38, 39] составлены графические зависимости параметров процесса электролиза воды от рабочего давления. Результаты представлены на рисунках 5-6.

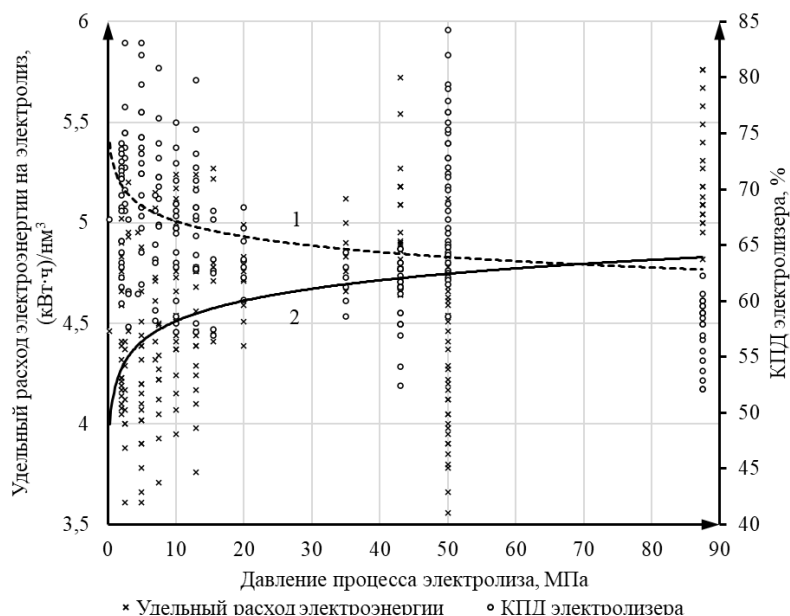


Рис. 5. Номограмма зависимости удельного расхода электроэнергии на выработку водорода и КПД электролизера от давления: 1, 2 – линии тренда КПД электролизера и удельного расхода электроэнергии на производство водорода, соответственно

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

Очевидно, что эффективность электролиза несколько снижается с увеличением давления процесса в соответствии с уравнением Нернста, приведенным выше.

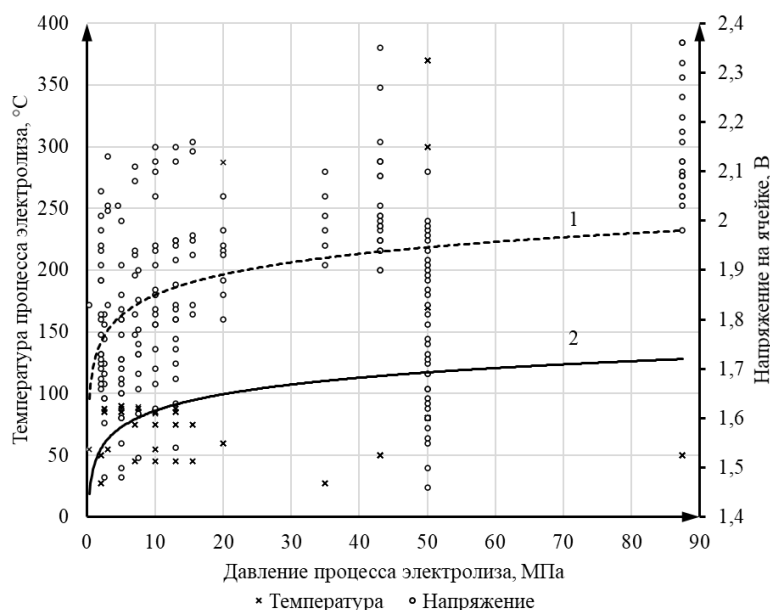


Рис. 6. Номограмма зависимости температуры и напряжения на ячейке от давления: 1, 2 – линии тренда напряжения на ячейке и температуры процесса электролиза соответственно

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

Из представленных зависимостей видно, что с повышением давления необходимо увеличение температуры рабочего процесса. При этом зависимости 2 на рисунке 5 соответствует аналогичная зависимость 2 на рисунке 6.

Дополнительно представлена зависимость удельного расхода электроэнергии и КПД электролизера от рабочей температуры процесса электролиза воды исследуемого диапазона высоких давлений на рисунке 7.

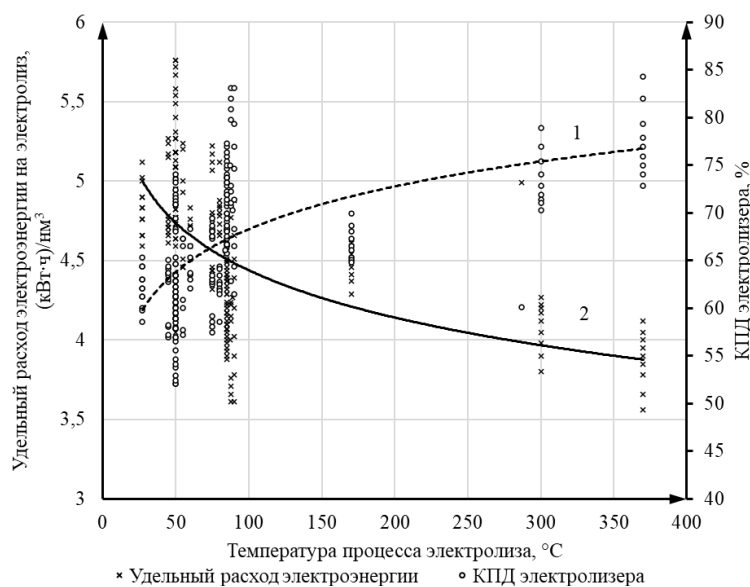


Рис. 7. Номограмма зависимости удельного расхода электроэнергии на выработку водорода и КПД электролизера от температуры: 1, 2 – линии тренда КПД электролиза и удельного расхода электроэнергии на производство водорода соответственно

Fig. 7. Nomogram of the dependence of the specific electricity consumption for hydrogen production and the efficiency of the electrolyser on the temperature: 1, 2 – trend lines of the electrolysis efficiency and specific electricity consumption for hydrogen production, respectively

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

Увеличение рабочей температуры повышает эффективность процесса электролиза, в то время как увеличение давления приводит к снижению КПД электролизной установки. Таким образом, можно утверждать о нивелировании снижения КПД электролиза за счет роста температуры процесса.

Следует отметить, что на представленных номограммах область значений при температуре свыше 200 °С показана для щелочного электролиза высокого давления [36]. Для РЕМ-электролизеров в указанном диапазоне температур интенсифицируется процесс деградации твердополимерной мембраны с последующим разрушением.

Резюмируя вышесказанное, влияние высокого давления на процесс электролиза характеризуется рядом явлений, совокупность которых отражена в результирующем факторе воздействия перекрестного проникновения газов сквозь твердополимерную мембрану, что ведет за собой риск образования взрывоопасной смеси по причине превышения минимально допустимой предельной концентрации водорода в смеси с кислородом. Известные методы снижения перекрестного проникновения газов способствуют обеспечению безопасной эксплуатации оборудования в том числе с использованием высоких давлений в процессе электролиза.

Используемые исходные данные занесены в таблицу 1. Результаты сравнения отражены на рисунке 8, из которых очевидно преимущество водородного комплекса высокого давления по сравнению с компрессорной схемой: эффективность преобразования в пиковую мощность больше аналогичного параметра водородного комплекса с компрессорными машинами в 1,003...1,039 раза для диапазона давлений 80...10 МПа соответственно, исключая значения КЭП при 790 МВт провальной мощности при давлениях 50 и 80 МПа, для которых этот параметр либо равен, либо меньше соответствующего значения КЭП для компрессорной схемы.

При проведении расчетов дополнительно были учтены потери мощности вследствие роста производительности циркуляционных насосов в условиях увеличения расхода рабочего тела при паро-водородном перегреве. В зависимости от используемой провальной мощности 790...900...1200 МВт для компрессорной схемы этот параметр составляет 4...5...6 % соответственно. В случае схемы с электролизерами высокого давления учтены потери полезной мощности от дросселирования.

Таблица 1

Table 1

Исходные данные к определению коэффициента эффективности преобразования провальной мощности в пиковую

Initial data for determining the conversion efficiency coefficient

Используемая провальная мощность, МВт		790...900...1200			
Относительный внутренний КПД турбины с перегревом свежего пара для водородного комплекса с компрессорами η_{oi} , % / Температура перегрева свежего пара, °С		89,19...89,39...89,86 / 396...415...467			
КПД электролизной установки для водородного комплекса с компрессорами $\eta_{эу}$, %		80			
КПД поршневого компрессора $\eta_{компр}$, %		73			
КПД электрогенератора $\eta_{эг}$, %		99			
КПД механической передачи турбоагрегата $\eta_{мех}$, %		98,5			
Коэффициент учета затрат мощности на собственные нужды электролизной установки α , %		5			
Коэффициент учета потерь полезной мощности при дросселировании ψ		0,56...0,57...0,58			
Рабочее давление процесса электролиза p_j , МПа		10	30	50	80
КПД электролизной установки для водородного комплекса высокого давления $\eta_{эвд}$, %		73,55	72,5	72	71,5
Относительный внутренний КПД турбины с перегревом свежего пара для водородного комплекса высокого давления η_{oi} , % / Температура перегрева свежего пара, °С	790 МВт	88,481 / 390	88,476 / 389	88,476 / 389	88,391 / 388
	900 МВт	89,334 / 410	89,331 / 408	89,33 / 407	89,329 / 406
	1200 МВт	89,804 / 462	89,802 / 457	89,801 / 455	89,801 / 454

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

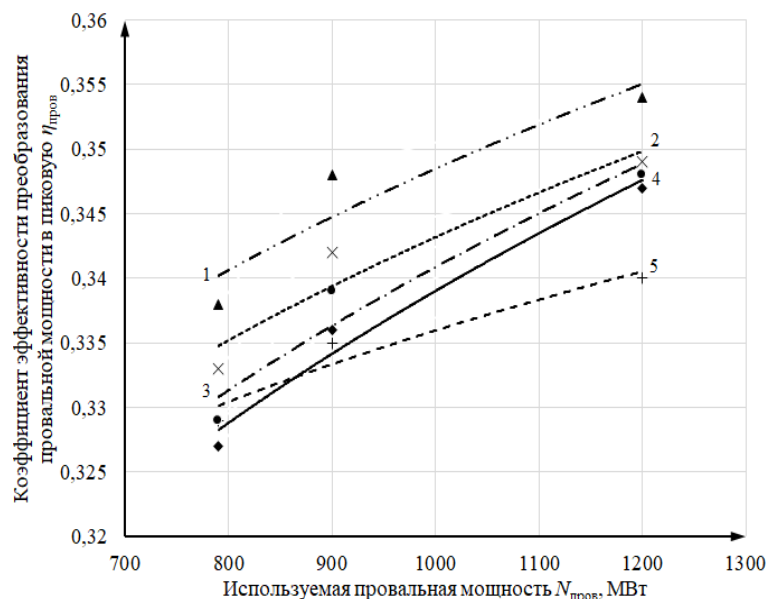


Рис. 8. Эффективность преобразования провальной мощности в пиковую: 1, 2, 3, 4 – для водородного комплекса высокого давления при 10, 30, 50 и 80 МПа соответственно; 5 – для водородного комплекса с использованием компрессорных машин

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

Результаты определения КПД АЭС брутто для исследуемых водородных комплексов низкого и высокого давлений приведены на рисунке 9, из которого видно, что КПД АЭС брутто в результате комбинирования атомной станции с водородным комплексом на основе процесса электролиза воды высокого давления оказывается больше аналогичного параметра для водородного комплекса с компрессорными установками в 1,009...1,019 раза для всего диапазона провальных мощностей с учетом варьирования по давлению аккумулирования 80...10 МПа соответственно.

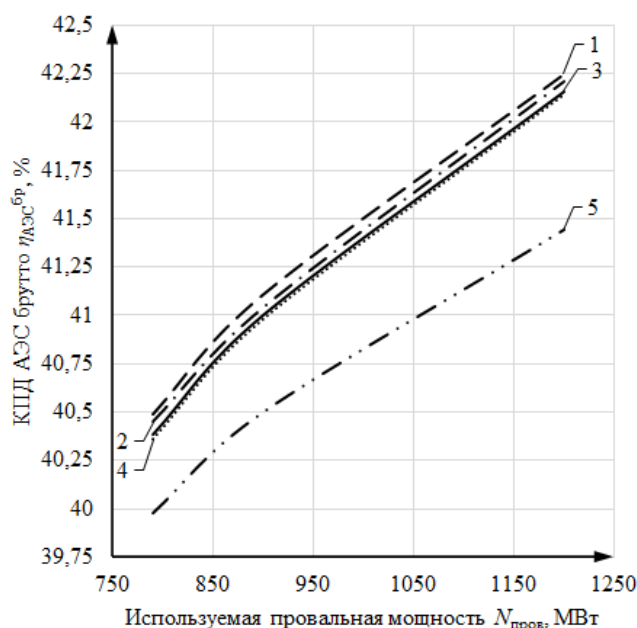


Рис. 9. Графики зависимости КПД АЭС брутто от используемой провальной мощности: 1, 2, 3, 4 – КПД АЭС брутто для водородного комплекса высокого давления при 10, 30, 50 и 80 МПа соответственно; 5 – КПД АЭС брутто для водородного комплекса с использованием компрессорных машин

Fig. 9. Graphs of dependence of NPP gross efficiency on the used power: 1, 2, 3, 4 – NPP gross efficiency for a high-pressure hydrogen complex at 10, 30, 50 and 80 MPa, respectively; 5 – NPP gross efficiency for hydrogen complex using compressor machines

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

Выводы (Conclusions)

1) Авторами разработан и запатентован новый принцип комбинирования АЭС с водородным комплексом на основе электролиза воды высокого давления. По оценкам, выполненным ранее, использование электролиза воды высокого давления приводит к заметному повышению вероятности безотказной работы водородного комплекса в целом по сравнению с вариантом при использовании компрессорных машин. В этих условиях обозначается необходимость проведения детального анализа особенностей высокого давления процесса электролиза, что необходимо принимать во внимание в дальнейшем.

2) В настоящее время в мире широким фронтом ведутся работы по всестороннему совершенствованию получения водорода электролизом воды. Одним из направлений является повышение давления процесса, что избавляет от необходимости применения компримирования. На сегодняшний день имеются результаты испытаний и исследований РЕМ-электролизеров в диапазоне давлений до 87,5 МПа. В результате анализа и обобщения мирового опыта, в том числе испытаний прототипов электролизеров и теоретических расчетов составлены оригинальные номограммы зависимости основных параметров электролиза от давления и температуры, из которых очевидно, что рост давления приводит к необходимости увеличения удельного расхода электроэнергии вследствие снижения выхода по току по причине неизбежных потерь водорода и кислорода при взаимной примеси в результате диффузии через мембрану и растворения вырабатываемых газов в воде. Данное обстоятельство, в свою очередь, приводит к некоторому снижению КПД электролиза. Принимая во внимание результаты расчета коэффициента эффективности преобразования провальной мощности в пиковую и КПД АЭС, хотя увеличение давления электролиза и приводит к снижению КПД процесса, водородный комплекс высокого давления оказывается более эффективным по сравнению с водородным комплексом при использовании компрессорных машин.

Литература

1. Энергетическая стратегия России на период до 2035 г. / Правительство Российской Федерации. – Москва, 2020 г. – 79 с.
2. Егоров А.Н., Байрамов А.Н. Электролиз воды и обратимые топливные элементы – перспективные «зеленые» технологии для водородной энергетики // Энергобезопасность и энергосбережение. 2023. Т.3. №111. С. 23-32.

3. Байрамов А.Н., Макаров Д.А. Водородный комплекс на основе электролиза воды высокого давления для комбинирования с атомной станцией. Патент РФ на изобретение №2821330. 21.06.2024. Бюл. № 18.
4. Байрамов А. Н., Макаров Д. А. Разработка и обоснование нового принципа комбинирования АЭС с водородным комплексом // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. 2024. Т. 5. №422. С. 30-50.
5. Байрамов А. Н. Разработка научных основ повышения эффективности АЭС при комбинировании с водородным комплексом [Текст]: дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук: 05.14.01 / Артем Николаевич Байрамов; науч. конс. Р. З. Аминов. – Саратов, 2022. – 397 с.
6. Аминов Р.З., Байрамов А.Н. Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями. М.: Наука, 2016. 254с.
7. Schalenbach M., Carmo M., Fritz D.L., et al. Pressurized PEM water electrolysis: Efficiency and gas crossover // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013. Vol. 38, N35. pp. 14921-14933.
8. Dang J., Li Y., Liu B., et al. Design and economic analysis of high-pressure proton exchange membrane electrolysis for renewable energy storage // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48, N28. pp. 10377-10393.
9. Sethuraman V., Weidner J., Haug A., et al. Hydrogen Peroxide Formation Rates in a PEMFC Anode and Cathode: Effect of Humidity and Temperature // *Journal of The Electrochemical Society*. 2008. Vol. 155, N1.
10. Kopitzke R., Linkous C., Anderson R., et al. Conductivity and Water Uptake of Aromatic-Based Proton Exchange Membrane Electrolytes // *Journal of The Electrochemical Society*. 2000. Vol. 147, N5. pp. 1677-1681.
11. Slade S., Campbell S., Ralph T., et al. Ionic Conductivity of an Extruded Nafion 1100 EW Series of Membranes // *Journal of The Electrochemical Society*. 2002. Vol. 149, N12. pp. 1556-1564.
12. Silva R., Francesco M., Pozio A. Tangential and normal conductivities of Nafion® membranes used in polymer electrolyte fuel cells // *Journal of Power Sources*. 2004. Vol. 134, N1, pp. 18-26.
13. LaConti A., Liu H., Mittelsteadt C. Polymer electrolyte membrane degradation mechanisms in fuel cells – findings over the past 30 years and comparison with electrolyzers // *ECS Transactions*. 2006. Vol. 1, N8. pp. 199-219.
14. Millet P., Ngameni R., Grigoriev SA, et al. PEM water electrolyzers: From electrocatalysis to stack development // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. Vol 35, N10. pp. 5043-5052.
15. Grigoriev SA, Fateev VN, Bessarabov DG, et al. Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45, N49. pp. 26036-26058.
16. Yigit T., Selamet O. Mathematical modeling and dynamic Simulink simulation of high-pressure PEM electrolyzer system // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41, N32. pp. 13901-13914.
17. Якименко Л. М., Модылевская И.Д., Ткачек З.А. Электролиз воды. М.: Химия, 1970. 263с.
18. Bensmann B., Hanke-Rauschenbach R., Arias I., et al. Energetic evaluation of high pressure PEM electrolyzer systems for intermediate storage of renewable energies // *Electrochimica Acta*. 2013. Vol. 110. pp. 570-580.
19. Degiorgis L., Santarelli M., Cali M. Hydrogen from renewable energy: A pilot plant for thermal production and mobility // *Journal of Power Sources*. 2007. Vol. 171, N1. pp. 237-246.
20. Marangio F., Santarelli M., Cali M. Theoretical model and experimental analysis of a high pressure PEM water electrolyser for hydrogen production // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. Vol. 34, N3. pp. 1143-1158.
21. Волощенко Г.Н., Порембский В.И. Электролизная установка высокого давления. Патент РФ на изобретение №2660902. 11.07.2018. Бюл. № 20.
22. Съоли Д. Электролизер высокого давления. Патент РФ на изобретение №2496918. 27.10.2013 Бюл. № 30.
23. Kim H., Park M., Lee K. One-dimensional dynamic modeling of a high-pressure water electrolysis system for hydrogen production // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013. Vol. 38, N6. pp. 2596-2609.
24. Ito H., Maeda T., Nakano A., et al. Properties of Nafion membranes under PEM water electrolysis conditions // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011. Vol. 36, N17. pp. 10527-10540.
25. Zawodzinski T., Davey J., Valerio J., et al. The water content dependence of electro-osmotic drag in proton-conducting polymer electrolytes // *Electrochimica Acta*. 1995. Vol. 40, N3. pp. 297-302.
26. Sartory M., Wallnöfer-Ogris E., Salman P., et al. Theoretical and experimental analysis of an asymmetric high pressure PEM water electrolyser up to 155 bar // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42, N52. pp. 30493-30508.

27. Grigoriev SA, Millet P., Korobtsev SV, et al. Hydrogen safety aspects related to high-pressure polymer electrolyte membrane water electrolysis // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. Vol. 34, N14. pp. 5986-5991.
28. Добровольский Ю.А., Волков Е.В., Писарева А.В., и др. Протонообменные мембраны для водородно-воздушных топливных элементов // *Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева)*. 2006. Т. 1. №6. С. 95-104.
29. Klose C., Trinke P., Böhm T., et al. Membrane Interlayer with Pt Recombination Particles for Reduction of the Anodic Hydrogen Content in PEM Water Electrolysis // *Journal of The Electrochemical Society*. 2018. Vol. 165, N16.
30. Correa G., Marocco P., Muñoz P., et al. Pressurized PEM water electrolysis: Dynamic modelling focusing on the cathode side // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47, N7. pp. 4315-4327.
31. Hancke R., Holm T., Ulleberg O. The case for high-pressure PEM water electrolysis // *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 261, N115642.
32. Dang J., Zhang J., Deng X., et al. Hydrogen crossover measurement and durability assessment of high-pressure proton exchange membrane electrolyzer // *Journal of Power Sources*. 2023. Vol. 563, N232776.
33. Grigoriev SA, Poremskiy VI, Korobtsev SV, et al. High-pressure PEM water electrolysis and corresponding safety issues // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011. Vol. 36, N3. pp. 2721-2728.
34. Кулешов Н.В., Григорьев С.А., Кулешов В.Н., и др. Низкотемпературные электролизеры воды для автономных энергоустановок с водородным накоплением энергии // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAE)*. 2013. Т. 06/1. №127. С. 23-27.
35. Hancke R., Bujlo P., Holm T., et al. High-pressure PEM water electrolyser performance up to 180 bar differential pressure // *Journal of Power Sources*. 2024. Vol. 601, N234271.
36. Hourng L., Tsai T., Lin M. The analysis of energy efficiency in water electrolysis under high temperature and high pressure. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on New Energy and Future Energy System (NEFES 2017), Kunming, China. 22-25 Sep 2017.
37. Байрамов А.Н. Программа вычисления технико-экономической эффективности использования водородных надстроек на АЭС. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013660650. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14 ноября 2013 г.
38. Holm T., Borsboom-Hanson T., Herrera O., et al. Hydrogen costs from water electrolysis at high temperature and pressure // *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 237, N114106.
39. Hamdan M. High Pressure PEM Electrolysis: Status, Key Issues, and Challenges. In: *Electrolytic Hydrogen Production Workshop NREL, Golden, Colorado. 27-28 Feb 2014*. Available at: https://www.energy.gov/sites/default/files/2014/08/f18/fcto_2014_electrolytic_h2_wkshp_hamdan1.pdf

Авторы публикации

Байрамов Артем Николаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Тепловая и атомная энергетика имени А.И. Андрющенко» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (СГТУ), ведущий научный сотрудник Отдела энергетических проблем Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук», г. Саратов, Россия. *ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1573-0578>, art2198@yandex.ru*

Макаров Даниил Алексеевич – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (СГТУ), лаборант-исследователь Отдела энергетических проблем Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук», г. Саратов, Россия. *daniel_makaroff@mail.ru*

Седелкин Валентин Михайлович – д-р техн. наук, профессор Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (СГТУ), г. Саратов, Россия.

References

1. Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2035 g. / Pravitel'stvo Rossijskoj federacii. – Moskva, 2020 g. – 79 s.
2. Egorov AN, Bayramov AN. Elektroliz vody i obratimye toplivnye elementy – perspektivnye «zelenye» tekhnologii dlya vodorodnoj energetiki. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*. 2023;№3(111):23-32.
3. Bayramov AN, Makarov DA. Vodorodnyj kompleks na osnove elektroliza vody vysokogo davleniya dlya kombinirovaniya s atomnoj stanciej. Patent RUS №2821330. 21.06.2024. Byul. № 18.

4. Bayramov AN, Makarov DA. Razrabotka i obosnovanie novogo principa kombinirovaniya AES s vodorodnym kompleksom. *Alternativnaya energetika i ekologiya (ISJAEE)*. 2024; 5(422):30-50
5. Bayramov AN. Razrabotka nauchnyh osnov povysheniya effektivnosti AES pri kombinirovanii s vodorodnym kompleksom [dissertation]. Saratov; 2022.
6. Aminov RZ, Bayramov AN. Kombinirovanie vodorodnyh energeticheskikh ciklov s atomnymi elektrostanciyami. Moscow: Nauka; 2016. (In Russ).
7. Schalenbach M, Carmo M, Fritz D, et al. Pressurized PEM water electrolysis: Efficiency and gas crossover. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013;38(35):14921-14933. doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.09.013
8. Dang J, Li Y, Liu B, et al. Design and economic analysis of high-pressure proton exchange membrane electrolysis for renewable energy storage. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(28):10377-10393. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.250
9. Sethuraman V, Weidner J, Haug A, et al. Hydrogen Peroxide Formation Rates in a PEMFC Anode and Cathode: Effect of Humidity and Temperature. *Journal of The Electrochemical Society*. 2008;155(1). doi: 10.1149/1.2801980
10. Kopitzke R, Linkous C, Anderson R, et al. Conductivity and Water Uptake of Aromatic-Based Proton Exchange Membrane Electrolytes. *Journal of The Electrochemical Society*. 2000;147(5):1677-1681. doi: 10.1149/1.1393417
11. Slade S, Campbell S, Ralph T, et al. Ionic Conductivity of an Extruded Nafion 1100 EW Series of Membranes. *Journal of The Electrochemical Society*. 2002;149(12):1556-1564. doi: 10.1149/1.1517281
12. Silva R, Francesco M, Pozio A. Tangential and normal conductivities of Nafion® membranes used in polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Power Sources*. 2004;134(1):18-26. doi: 10.1016/j.jpowsour.2004.03.028
13. LaConti A, Liu H, Mittelsteadt C. Polymer electrolyte membrane degradation mechanisms in fuel cells – findings over the past 30 years and comparison with electrolyzers. *ECS Transactions*. 2006;1(8):199-219. doi: 10.1149/1.2214554
14. Millet P, Ngameni R, Grigoriev SA, et al. PEM water electrolyzers: From electrocatalysis to stack development. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009;35(10):5043-5052. doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.09.015
15. Grigoriev SA, Fateev VN, Bessarabov DG, et al. Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(49):26036-26058. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.109
16. Yigit T, Selamet O. Mathematical modeling and dynamic Simulink simulation of high-pressure PEM electrolyzer system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016;41(32):13901-13914. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.06.022
17. YAkimenko LM, Modylevskaya ID, Tkachek ZA. *Elektroliz vody*. Moscow: Himiya: 1970. (In Russ).
18. Bensmann B, Hanke-Rauschenbach R, Arias I, et al. Energetic evaluation of high pressure PEM electrolyzer systems for intermediate storage of renewable energies. *Electrochimica Acta*. 2013;110:570-580. doi: 10.1016/j.electacta.2013.05.102
19. Degiorgis L, Santarelli M, Cali M. Hydrogen from renewable energy: A pilot plant for thermal production and mobility. *Journal of Power Sources*. 2007;171(1):237-246. doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.01.060
20. Marangio F, Santarelli M, Cali M. Theoretical model and experimental analysis of a high pressure PEM water electrolyser for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009;34(3):1143-1158. doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.11.083
21. Voloshchenko GN, Porembskij VI. Elektroliznaya ustanovka vysokogo davleniya. Patent RUS №2660902. 11.07.2018. Byul. № 20.
22. S'oli D. Elektrolizer vysokogo davleniya. Patent RUS №2496918. 27.10.2013 Byul. № 30.
23. Kim H, Park M, Lee K. One-dimensional dynamic modeling of a high-pressure water electrolysis system for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013;38(6):2596-2609. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.12.006
24. Ito H, Maeda T, Nakano A, et al. Properties of Nafion membranes under PEM water electrolysis conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011;36(17):10527-10540. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.05.127
25. Zawodzinski T, Davey J, Valerio J, et al. The water content dependence of electro-osmotic drag in proton-conducting polymer electrolytes. *Electrochimica Acta*. 1995;40(3):297-302. doi: 10.1016/0013-4686(94)00277-8
26. Sartory M, Wallnöfer-Ogris E, Salman P, et al. Theoretical and experimental analysis of an asymmetric high pressure PEM water electrolyser up to 155 bar. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017;42(52):30493-30508. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.10.112

27. Grigoriev SA, Millet P, Korobtsev SV, et al. Hydrogen safety aspects related to high-pressure polymer electrolyte membrane water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009;34(14):5986-5991. doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.01.047
28. Dobrovol'skij YUA, Volkov EV, Pisareva AV, i dr. Protonoobmennye membrany dlya vodorodno-vozdushnyh toplivnyh elementov. *Rossiiskij himicheskij zhurnal (Zhurnal Rossijskogo himicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva)*. 2006;1(6):95-104
29. Klose C, Trinke P, Böhm T, et al. Membrane Interlayer with Pt Recombination Particles for Reduction of the Anodic Hydrogen Content in PEM Water Electrolysis. *Journal of The Electrochemical Society*. 2018;165(16). doi: 10.1149/2.1241814jes
30. Correa G, Marocco P, Muñoz P, et al. Pressurized PEM water electrolysis: Dynamic modelling focusing on the cathode side. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(7):4315-4327. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.097
31. Hancke R, Holm T, Ulleberg O. The case for high-pressure PEM water electrolysis. *Energy Conversion and Management*. 2022;261(115642). doi: 10.1016/j.enconman.2022.115642
32. Dang J, Zhang J, Deng X, et al. Hydrogen crossover measurement and durability assessment of high-pressure proton exchange membrane electrolyzer. *Journal of Power Sources*. 2023;563(232776). doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.232776
33. Grigoriev SA, Porembskiy VI, Korobtsev SV, et al. High-pressure PEM water electrolysis and corresponding safety issues. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011;36(3):2721-2728. doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.03.058
34. Kuleshov NV, Grigor'ev SA, Kuleshov VN, i dr. Nizkotemperaturnye elektrolizery vody dlya avtonomnyh energoustanovok s vodorodnym nakopleniem energii. *Alternativnaya energetika i ekologiya (ISJAE)*. 2013;06/1(127):23-27
35. Hancke R, Bujlo P, Holm T, et al. High-pressure PEM water electrolyser performance up to 180 bar differential pressure. *Journal of Power Sources*. 2024;601(234271). doi: 10.1016/j.jpowsour.2024.234271
36. Hourng L, Tsai T, Lin M. The analysis of energy efficiency in water electrolysis under high temperature and high pressure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on New Energy and Future Energy System (NEFES 2017)*, Kunming, China. 22-25 Sep 2017. doi: 10.1088/1755-1315/93/1/012035
37. Bayramov AN. Programma vychisleniya tekhniko-ekonomicheskoy effektivnosti ispol'zovaniya vodorodnyh nadstroek na AES. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM №2013660650. Zaregistrovano v Reestre programm dlya EVM 14 noyabrya 2013 g.
38. Holm T, Borsboom-Hanson T, Herrera O, et al. Hydrogen costs from water electrolysis at high temperature and pressure. *Energy Conversion and Management*. 2021;237(114106). doi: 10.1016/j.enconman.2021.114106
39. Hamdan M. High Pressure PEM Electrolysis: Status, Key Issues, and Challenges. In: *Electrolytic Hydrogen Production Workshop NREL*, Golden, Colorado. 27-28 Feb 2014. Available at: https://www.energy.gov/sites/default/files/2014/08/f18/fcto_2014_electrolytic_h2_wkshp_hamdan1.pdf

Authors of the publication

Artem N. Bayramov – Department of Energy Problems of the Federal Research Center "Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Saratov State Technical University named after Y.A. Gagarin, Saratov, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1573-0578>, art2198@yandex.ru

Daniil A. Makarov – Department of Energy Problems of the Federal Research Center "Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Saratov State Technical University named after Y.A. Gagarin, Saratov, Russia. daniel_makarov@mail.ru

Valentin M. Sedelkin – Saratov State Technical University named after Y.A. Gagarin, Saratov, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено 18.03.2025 г.

Отредактировано 22.07.2025 г.

Принято 12.08.2025 г.



ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АНТИНАКИПНОГО УСТРОЙСТВА НА ПАРОВОМ КОТЛЕ ДЕ-25-24

Павлов Г.И., Ситников О.Р., Накоряков П.В.

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань, Россия
Halmer169990@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке опытно-промышленного образца антинакипного устройства, использующего принцип ультразвуковой технологии предотвращения образования накипи, основанном на комплексном физическом воздействии механических колебаний на жидкость и поверхность труб, путем наложения на колебания ультразвуковой частоты звуковых колебаний высокой интенсивности. ЦЕЛЬ. Экспериментально оценить эффективность комплексного способа ультразвукового удаления отложений накипи с внутренних стенок теплообменных труб. Рассмотреть возможность увеличения срока службы теплообменных котлов за счёт повышения качества удаления отложений накипи с поверхностей теплообменных труб с помощью ультразвуковых и звуковых колебаний. МЕТОДЫ. Практические эксперименты и оценка эффективности комплексного способа ультразвукового удаления отложений накипи проводились на опытно-промышленном образце антинакипного устройства, смонтированном на паровом котле котельной. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, рассмотрены особенности разработанного антинакипного устройства и особенности его монтажа на элементах теплообменника котла. Рассмотрена экспериментальная оценка эффективности способа ультразвукового удаления отложений накипи с внутренних стенок теплообменных труб. Сделаны выводы об эффективности заявляемого способа. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанное опытно-промышленное антинакипное устройство использует комплексное воздействие механических колебаний на жидкость и поверхность труб, что повышает эффективность воздействия по предотвращению и удалению твердых отложений теплообменника. Положительный эффект очистки внутренних поверхностей теплообменника установлен экспериментально. Полученные результаты позволяют прогнозировать возможность увеличения срока службы теплообменных котлов.

Ключевые слова: антинакипное устройство; комплексное воздействие механических колебаний; удаление отложений накипи в теплообменных аппаратах.

Для цитирования: Павлов Г.И., Ситников О.Р., Накоряков П.В. Об эффективности использования антинакипного устройства на паровом котле ДЕ-25-24 // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 123-134. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-123-134.

ON THE EFFICIENCY OF USING ANTI-SCALE DEVICE ON STEAM BOILER DE-25-24

Pavlov G.I., Sitnikov O.R., Nakoryakov P.V.

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan,
Russia
Halmer169990@mail.ru

Abstract: THE RELEVANCE of the study is to develop a pilot industrial model of an anti-scale device using the principle of ultrasonic technology to prevent scale formation, based on the complex physical impact of mechanical vibrations on the liquid and the surface of pipes, by superimposing high-intensity sound vibrations on the vibrations of the ultrasonic frequency.

THE PURPOSE. To experimentally evaluate the efficiency of a complex method of ultrasonic removal of scale deposits from the inner walls of heat exchange pipes. To consider the possibility of increasing the service life of heat exchange boilers by improving the quality of scale deposit removal from the surfaces of heat exchange pipes using ultrasonic and sound vibrations. **METHODS.** Practical experiments and evaluation of the effectiveness of the integrated method of ultrasonic removal of scale deposits were carried out on a pilot-industrial model of an anti-scale device mounted on a steam boiler of a boiler house. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, considers the features of the developed anti-scale device and the features of its installation on the elements of the boiler heat exchanger. An experimental assessment of the effectiveness of the method of ultrasonic removal of scale deposits from the inner walls of heat exchange pipes is considered. **Conclusions** are made about the effectiveness of the claimed method. **CONCLUSION.** The developed pilot-industrial anti-scale device uses the complex effect of mechanical vibrations on the liquid and the surface of pipes, which increases the effectiveness of the action to prevent and remove solid deposits from the heat exchanger. The positive effect of cleaning the internal surfaces of the heat exchanger has been established experimentally. The results obtained allow us to predict the possibility of increasing the service life of heat exchange boilers.

Keywords: anti-scale device; complex effect of mechanical vibrations; removal of scale deposits in heat exchangers.

For citation: Pavlov G.I., Sitnikov O.R., Nakoryakov P.V. On the efficiency of using anti-scale device on steam boiler DE-25-24. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (4): 123-134. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-123-134.

Введение (Introduction)

Современная котельная установка является сложным сооружением, включающим в себя различное оборудование, связанное в единое целое общей технологической схемой, основным элементом которой является котельный агрегат [1].

Одной из основных проблем промышленной энергетики является снижение эффективности работы промышленных котлов, обусловленной образованием отложений солей жесткости и продуктов коррозии на теплообменных поверхностях котлов [2]. В условиях неправильной работы поверхностей нагрева возможно образование больших объемов сорванной пленки пограничного слоя, что приводит к разрушению («пережогу») стенки трубы и образованию накипи [3]. Предотвращение накипеобразования и защита от коррозии являются одной из актуальных проблем, связанных с эксплуатацией котельных агрегатов.

Надежность работы поверхностей нагрева котлов зависит от качества питательной и подпиточной воды [4]. Вода является универсальным растворителем и вместе с ней в котел поступают различные минеральные примеси. Данные примеси делятся на трудно- и легкорастворимые. К числу труднорастворимых примесей относят соли гидроксида Са и Mg. Основные накипеобразователи характеризуются тем, что при повышении температуры их растворимость падает. Таким образом, накапливаясь в котле, по мере испарения воды, эти примеси после прохождения точки насыщения выпадают в воде. Прежде всего, это соли жесткости – $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, CaCO_2 , MgCO_2 – взвешенные и коллоидные частицы, находящиеся в воде котла [5].

Одним из самых отрицательных свойств накипи является ее весьма низкая теплопроводность (0,1-0,2 Вт/м*К). Поэтому даже малый слой накипи приводит к резкому ухудшению теплопередачи и, вследствие этого, к повышению его температуры, что может привести к потере прочности стенки котла и его разрушению [6]. Обладая низкой теплопроводностью, слой накипи снижает коэффициент полезного действия котла в целом [7]. Низкая теплопередача накипи приводит к сильному перегреву металла поверхностей нагрева, из-за чего на трубах появляются трещины, вздутия и деформации [8]. Это нередко является причиной аварийных ситуаций, сокращения межремонтных сроков и увеличения затрат на ремонт и обслуживание. Например, при слое накипи толщиной 0,2 мм температура стенок котла сильно отличается от температуры котловой воды и в современных котлах достигает около 700°С, что может привести к аварийному разрыву экранных труб [9]. Накипь также уменьшает сечение труб, увеличивая их гидросопротивление, а это влечет за собой дополнительные потери электроэнергии в насосном оборудовании на перекачку воды. Перегрев металла, несвоевременная и

некачественная очистка неизбежно приводят к сокращению срока службы котлов в 2-3 раза, неоправданным затратам на приобретение и монтаж новых котлов взамен вышедших из строя [10].

Для уменьшения и исключения накипеобразования обычно проводится предварительное химическое умягчение воды в установках докотловой обработки воды [4]. Водоподготовка осуществляется в специальных установках и она связана со значительными затратами и большим расходом необходимых химических реагентов, в частности, поваренной соли для регенерации фильтров. Водоподготовительные установки требуют строгого соблюдения режимных параметров, зависящих от квалификации лаборанта и, при их нарушении, эффективность химической подготовки воды сильно снижается [11].

Наряду с химическими, в последние годы находят все более широкое применение находят физические (безреагентные) методы предотвращения накипеобразования, в частности, ультразвуковой. Этот метод не требует больших капитальных затрат, исключает применение химических реагентов, имеет невысокую трудоемкость и не вызывает загрязнения окружающей среды.

Принцип ультразвуковой технологии предотвращения образования накипи основан на воздействии механических колебаний ультразвуковой частоты на механизм накипеобразования при его работе [12]. С помощью ультразвуковой установки в металле котла и в воде, заполняющей его, возбуждаются маломощные ультразвуковые колебания. Под действием этих колебаний соли жесткости начинают кристаллизироваться непосредственно в толще воды, образуя мелкодисперсный шлам, а колебания поверхностей нагрева препятствуют осаждению шлама на стенках труб [13]. Поэтому шлам находится в воде во взвешенном состоянии и удаляется из теплоагрегата при регулярных продувках, в результате чего образования накипи не происходит. Ультразвук также воздействует на осевший на стенки шлам, препятствуя образовавшемуся слою уплотняться, а на ранее образовавшуюся накипь оказывает разрушающее действие. Ультразвуковые колебания, воздействуя на поверхность нагрева, создают знакопеременные механические усилия, под влиянием которых прочность связи внутри накипи, а также между накипью и металлом нарушается, и образуются трещины [14]. Вода под действием капиллярных сил быстро проникает через трещины-капилляры к поверхности нагрева, где она быстро испаряется, вызывая вспучивание и отслаивание накипи. Содержащиеся в воде газовые пузырьки, также попадая в трещины между накипью и металлом, начинают колебаться с ультразвуковой частотой, ослабляя сцепление накипи с металлом. Отслоившиеся мелкие частицы и чешуйки накипи удаляются из котла при периодических продувках. То есть, происходит постепенное очищение котла в процессе его работы. Ультразвуковые колебания увеличивают теплопередачу греющей поверхности за счет повышения скорости потока воды из-за снижения гидродинамического сопротивления труб с колеблющимися стенками. Под действием ультразвука улучшается отвод пузырьков пара от поверхности нагрева и дегазация воды вследствие лучшего перемешивания пристеночного слоя жидкости, что также способствует увеличению теплопередачи [15]. Трубы поверхностей нагрева имеют естественные дефекты – узкие микронные щели и трещины, где в обычных условиях (без ультразвука) сохраняется кислород воздуха. При воздействии ультразвуковых колебаний кислород легко выходит из этих щелей, в результате этого исключается один из механизмов кислородной коррозии металла труб.

Приведенные выше факторы взаимосвязаны и в совокупности являются причиной положительного воздействия ультразвука на процессы предотвращения накипеобразования, снижения коррозии металла и повышения эффективности работы теплотехнического оборудования. Применение ультразвукового метода исключает загрязнение окружающей среды вредными стоками водоподготовительных установок, а стоимость обработки 1 м³ воды этим способом, как показывают ориентировочные расчеты, в 200-250 раз ниже стоимости химической обработки. Для примера, капитальные вложения, связанные с приобретением, монтажом и наладкой ультразвуковых противонакипных установок «Волна» выпускаемых предприятием «Агроприбор», окупаются в течение нескольких месяцев их работы. Обслуживание установок не требует привлечения дополнительных трудовых ресурсов и может производиться штатным персоналом котельной после предварительного изучения конструкции и правил эксплуатации установки. Однако, следует отметить, что вышеназванные эффекты проявляются при достаточно высоких уровнях интенсивности ультразвуковых колебаний, пороговое значение которого регламентировано интенсивностью протекания

гравитационных явлений.

Из гидродинамики хорошо известно, что кавитация в жидкостях является одним из распространенных механизмов разрушения металла, и при превышении определенного уровня интенсивности в теплообменных трубах начинают возникать негативные процессы. В связи с этим разработчики ультразвуковых антинакипных устройств перестраховываются и поставляют на рынок аппараты с низкой мощностью [16]. Из-за этого вышеперечисленные преимущества ультразвука в котлах проявляются не в полной мере. Часть шлама оседает на стенках и под действием диффузионных сил держится на них [17]. Для удаления его со стенок теплообменных аппаратов необходимо оказывать на него дополнительное механическое воздействие, например, звуковыми волнами, распространяющимися как в металле, так и в жидком теплоносителе.

Акустическое воздействие на накипеобразование относится к физическим методам воздействия. Как указывалось выше, соли жесткости оседают и образуют на нагретой поверхности твердые отложения за счет диффузионных сил. Несмотря на множество работ, выполненных по рассматриваемой теме, механизм осадкообразования до конца не изучен. Исследования в данной области продолжаются. Для примера, в работе [18] отмечено, что на процесс отложения накипи влияют геометрические параметры теплообменников, режимные характеристики потока, размер и концентрации частиц, приводится математическая модель образования накипи для сложных условий, когда на стенках теплообменного аппарата конденсируется парогазовая смесь с твердыми частицами. В соответствии с предложенной моделью толщина отложений зависит от физических свойств накипи, таких как: термическая проводимость, коэффициент теплопроводности, тепловой коэффициент приращения. Полученные результаты весьма полезны для решения обратной задачи – изучению процесса разрушения твердых отложений под воздействием физического воздействия, например, акустического в диапазоне звуковых колебаний. В такой постановке вопроса ранее исследования не проводились.

В данной работе объектом исследования являлось накипеобразование на нагретой поверхности электрического ТЭНа со стальным корпусом, помещенного в проточный нагреватель.

Предмет исследования – оценка эффективности комплексного воздействия звука в ультразвуковом и звуковом диапазонах на твердые отложения на стенках труб.

Задачи исследований:

- разработать экспериментальную установку (проточный нагреватель) для исследования интенсивности накипеобразования при различных условиях его работы;
- провести анализ воды на содержание солей жесткости, используемой в экспериментах;
- экспериментально исследовать скорость накипеобразования на стенках электрического ТЭНа в условиях ультразвуковых колебаний с наложением звуковых колебаний разных частот;
- разработать опытно-промышленное антинакипное устройство для апробирования на рабочем котле ДЕ-25-24;
- разработать программу испытаний и провести опытно-промышленные испытания устройства с оценкой эффективности его работы с использованием тест-платин.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для решения поставленных задач была разработана экспериментальная установка, схема которой приведена на рисунке 1.

Установка включала в себя проточный нагреватель 4 (рис. 1) с электронагревателем 6, систему подачи воды с входным патрубком 9, вибратор 1, ультразвуковой генератор 5. Проточный нагреватель 4 содержит два патрубка: входной 9 и выходной 2, к которым соединены водопроводные трубы. Для регистрации расхода воды и температуры на входе в нагреватель предусмотрены расходомер 8 – универсальный водосчетчик с импульсным выходом Valtec VLF-15U-I и датчик температуры 7 – термометр биметаллический Stout с погружной гильзой. Минимальный расход воды, измеряемый данным счетчиком, составляет 0,03 м³/ч. На выходе регистрируется температура нагретой воды при помощи аналогового прибора – термометра для воды Uni-Fitt 120°C. Внутри корпуса проточного нагревателя расположен электрический нагреватель 10 Rexant RDT-1500 Вт, с переменным электрическим питанием 220 В. К корпусу проточного нагревателя 4 сверху через стержень прикреплен ультразвуковой генератор 5 УЗА-2 (модель НО-478), к торцевой части корпуса свободно примкнут стержень вибратора 1 – перфоратора BOSCH RBH-2800. Число ударов перфоратора при максимальном числе оборотов двигателя 1450 об/мин составляет 4000 уд/мин, что составляет 66 Гц. Имеется электронная

регулировка числа оборотов. Сила удара равна 2,6 Дж. Для оценки параметров вибрации на корпусе проточного нагревателя использовался пьезоэлектрический датчик KD-35A (производства ГДР, фирма RFT), имеющего чувствительность $5,0 \text{ мВ} \cdot \text{м/с}^2$ и цифровой осциллограф GDS-71062A. Регистрировались частота колебания и виброперемещение на корпусе нагревателя. Максимальная погрешность датчика KD-35 составляла 1,8%, максимальная погрешность канала вертикального отклонения осциллографа в режиме измерения напряжения – не более 3%.

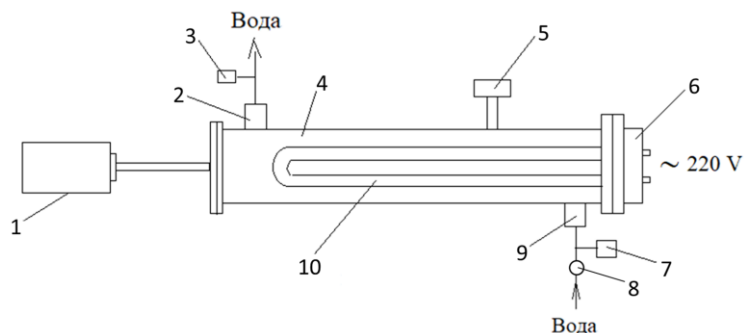


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – вибратор; 2 – выходной патрубок; 3 – датчик температуры; 4 – корпус проточного нагревателя; 5 – ультразвуковой генератор; 6 – электронагреватель; 7 – датчик температуры; 8 – расходомер; 9 – входной патрубок; 10 – нагревательный элемент

Fig. 1. Experimental setup diagram:

1 – vibrator; 2 – outlet pipe; 3 – temperature sensor; 4 – flow heater housing; 5 – ultrasonic generator; 6 – electronic heater; 7 – temperature sensor; 8 – flow meter; 9 – inlet pipe; 10 – heating element

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

Эксперименты проводились на артезианской воде со следующими характеристиками: вода негазированная, жесткость 22,4 мг-экв/л, массовая доля гидрокарбонат-ионов (HCO_3) 186,3 мг/дм³, щелочность 12,6 мг-экв/л. Продолжительность каждого эксперимента составляла 4 часа. Это время было определено экспериментально, оно соответствовало полному покрытию нагревательных элементов тэна солями жесткости. Вибратор включался через каждый час на период времени равный одной минуте. Эффективность воздействия звуковых колебаний на накипеобразование оценивалась тестовым методом путем взвешивания массы электронагревателя на электронных весах до и после проведения эксперимента. По разнице массы определялась эффективность режима воздействия звуковых колебаний на процессы накипеобразования. Очистка поверхности нагревательного элемента после экспериментов осуществлялась химическим методом с использованием раствора воды и лимонной кислоты. Результаты исследований были обобщены и представлены в виде графика зависимости разницы массы Δm (количества твердых отложений) от частоты вибрации звуковых колебаний ν , представленном на рисунке 2.

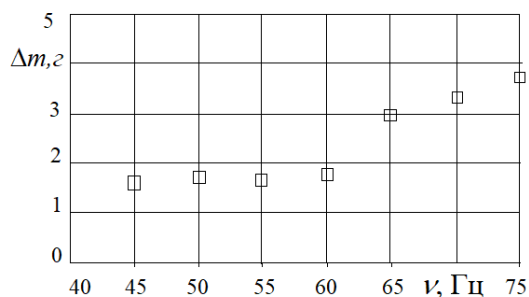


Рис. 2. График зависимости количества твердых отложений Δm от частоты звуковых колебаний ν

Fig. 2. Graph of the dependence of the amount of solid deposits Δm on the frequency of sound vibrations ν

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

Из рисунка видно, что частота звуковых колебаний сильно влияет на количество твердых отложений на поверхности нагревателя. В диапазоне частот от 45 Гц до 60 Гц условия осадкообразования на стенках нагревателя менее благоприятные, чем при

воздействии звука на высоких частотах. Предположительно, объяснить характер изменения полученной зависимости можно резонансными явлениями. При настройке вибратора на заданное значение частоты замечено, что амплитуда виброперемещения корпуса нагревателя при изменении частоты меняется. Так, в диапазоне частот 45-69 Гц амплитуда соответствует значениям 32-23 мкм, в случае более высоких частот соответствия следующие: 65 Гц – 12,9 мкм, 70 Гц – 10 мкм, 75 Гц – 10,4 мкм. Полученные результаты позволяют прийти к важному практическому выводу: звуковой генератор эффективнее работает при его настройке на резонансные частоты защищаемого элемента котла. Таким образом, опыты на экспериментальной установке позволили выявить наиболее благоприятный частотный диапазон для уменьшения осадкообразования на стенках нагревателя.

С учетом полученных данных, в ходе выполнения научно-исследовательских работ был разработан и опробован на практике опытно-промышленный образец антинакипного устройства, использующий принцип ультразвуковой технологии предотвращения образования накипи. Монтаж устройства проведен на паровом котле рабочей котельной. Предложенное антинакипное устройство апробировано на действующем котле ДЕ-25-24, эксплуатируемого в тепловых сетях АПТС (г. Альметьевск). В связи с большим износом водоподготовительного оборудования на таких котлах проблема накипеобразования стоит особо остро.

Разработанное антинакипное устройство для очистки теплообменников котельных от твердых отложений предназначено для использования в составе водонагревательных и паровых котлов с целью предотвращения образования накипи на наиболее проблемных участках теплообменной поверхности котлов. Устройство использует принцип ультразвуковой технологии предотвращения образования накипи, основанном на комплексном физическом воздействии механических колебаний на жидкость и поверхность труб, путем наложения на колебания ультразвуковой частоты звуковых колебаний высокой интенсивности, генерируемых другим источником. Низкочастотные колебания позволяют своевременно удалять с поверхности теплообменных труб разрыхленные твердые отложения, перенося их в теплоноситель. В дальнейшем, механические частицы выводятся из полости теплообменника при сдувке котла. Предложенное техническое решение приводит к увеличению срока службы теплообменных котлов за счёт повышения качества удаления отложений накипи с внутренних поверхностей теплообменных труб путем комплексного воздействия ультразвуковых и звуковых колебаний.

Общий вид опытно-промышленного антинакипного устройства, смонтированного на котле ДЕ-25-24 представлен на рисунке 3.



Рис. 3. Схема монтажа опытно-промышленного антинакипного устройства на котле ДЕ-25-24:

1 – ультразвуковые преобразователи;
2 – акустический вибратор; 3 – волновод

Fig. 3. Installation diagram of a pilot-industrial anti-chip device on a DE-25-24 boiler:

1 – ultrasonic transducers; 2 – acoustic vibrator;
3 – waveguide

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

Опытно-промышленное антинакипное устройство включает в себя:

- блок управления;
- генератор ультразвуковой частоты;

- ультразвуковые преобразователи;
- генератор звуковых колебаний;
- акустический вибратор;
- соединительные и питающие кабели.

Управление работой устройства для очистки теплообменников котельных от твердых отложений производится с блока управления, смонтированного в непосредственной близости от котла. Ультразвуковые преобразователи 1 (рис. 1) смонтированы на элементах теплообменника котла с помощью герметичных сварных швов. Количество преобразователей и точки их расположения выбираются с учетом конструкции котлоагрегата, его мощности и количества накипи, которое, в среднем, образуется за сезон эксплуатации. Для обеспечения требуемой температуры рабочих элементов, ультразвуковые преобразователи к нагретой части котла подключены через волновод.

По такой же технической схеме подключен акустический вибратор 2 звукового генератора, так как допустимая температура корпуса вибратора составляет не более 40 °С. Волновод 3 представляет собой цилиндрическую трубу длиной 40 см, диаметром 10 см и толщиной стенки 0,5 см, на боковой поверхности которого предусмотрены четыре стабилизатора шириной 5 см, толщиной 0,4 см и длиной 30 см, обеспечивающие температуру корпуса вибратора на допустимом уровне. Снижение уровня звука в таком волноводе составляет менее 0,5 %, что позволяет пренебречь звуковым сопротивлением волновода.

Генератор ультразвуковой частоты задает импульсы тока, которые через соединительные кабели передаются на ультразвуковые преобразователи. Ультразвуковые преобразователи преобразуют их в механические колебания ультразвуковой частоты, передающиеся на очищаемую поверхность конструкции. Они создают в пристенном слое трубы знакопеременное давление на частоте 22000 Гц, которое препятствует образованию накипи. Ультразвуковые преобразователи представляют собой серийно выпускаемые ультразвуковые антинакипные приборы УЗИ-074.

Генератор звуковых колебаний ЗГ-В предназначен для возбуждения колебаний в упругих средах в диапазоне частот от 50 Гц до 500 Гц. Акустический вибратор ЭВ-320Е – дебалансовый, представляет собой центробежный вибровозбудитель, вынуждающая сила которого вызывается вращательным движением инерционного элемента.

Механические колебания, создаваемые ультразвуковыми преобразователями, передаются в протекающий теплоноситель котлов и на очищаемую поверхность конструкции, где возникают колебания, разрушающие накипь на стенках и предотвращающие образование накипи. Под воздействием ультразвуковых колебаний накипь разрыхляется и при воздействии на него колеблющегося потока жидкости (возникают при распространении в жидкости звуковых колебаний) размельченные частицы накипи уносятся с потоком теплоносителя.

Отставшие от стенок теплоагрегата крупные частицы выпадают в осадок и удаляются продувкой агрегата. В дальнейшем, при непрерывной работе устройства, на очищенном от накипи оборудовании новые отложения не образуются.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Оценка эффективности способа ультразвукового удаления отложений накипи с внутренних стенок теплообменных труб проводилась экспериментально. Для оценки эффективности предложенных технических решений были выбраны два идентичных паровых котла ДЕ-25-24, расположенных в одной котельной, подключенных к одной и той же системе водоснабжения, и газовой линии. Один из котлов был оборудован антинакипным устройством, другой эксплуатировался в штатной комплектации. В ходе экспериментов тепловая нагрузка на обоих котлах поддерживалась на одном уровне.

Для оценки эффективности способа ультразвукового удаления отложений накипи с внутренних стенок теплообменных труб в коллекторы обоих паровых котлов в тыльной части вмонтировались лёгкосъёмные тест-пластины, изготовленные из того же металла, что и коллектор. Внешний вид тест-пластин представлен на рисунке 4. Предварительно, тест-пластины взвешивались на электронных весах ВЛТ-150-П, которые составили: для первого котла – 320,43 г, для второго котла – 328,63 г. Оба котла проработали три месяца с одинокой тепловой нагрузкой (котлы к линии выдачи пара были подключены параллельно).



Рис. 4. Внешний вид тест-пластины, установленной в коллекторе котла

Fig. 4. External view of the test plate installed in the boiler manifold

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

По истечении испытательного срока тест-пластины из коллекторов были извлечены. Было замечено, что на тестовой пластине, установленной на котле без антинакипного устройства, были замечены твердые отложения серо-коричневого цвета. На второй пластине, извлеченной из коллектора первого котла визуально следов образования твердых отложений не обнаружено.

После сушки пластин в естественных условиях они повторно взвешивались на весах. Определялась разница в весе тест-пластины как для первого, так и для второго котлов. Полученные значения сравнивались между собой. Определено, что масса твердых отложений на тест-пластине первого котла, оборудованного антинакипным устройством, на 6-8 граммов меньше, чем на тест-пластине второго котла.

Состояние стенок теплообменного аппарата на коте, оборудованном антинакипным устройством, также позволяло судить о хорошем положительном эффекте (рис. 5). На основании полученных экспериментальных данных можно сделать однозначный вывод о положительной эффективности предлагаемого способа.



Рис. 5. Состояние стенок теплообменника котла с установленным опытно-промышленным антинакипным устройством

Fig. 5. The condition of the walls of the boiler heat exchanger with the installed pilot-industrial anti-scale device

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

Оценка эффективности работы устройства проводилась также по изменению содержания механических частиц в продувочной воде. Предполагалось, что при сдувке котла с установленным антинакипным устройством содержание механических частиц в теплоносителе должно быть больше, чем в котле без использования устройства. Для проверки этого предположения проводился отбор проб теплоносителя после каждой продувки. Отбор проб проводился в разные сосуды, на которые были приклеены маркеры с надписями: дата отбора, номер котла, время отбора. Далее определялась масса

механических частиц, содержащейся в каждой пробе. Образцы проб и инструментальные средства, использованные при работе приведены на рисунке 6.



Рис. 6. Образцы проб воды

Fig. 6. Water samples

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

В дальнейшем полученные экспериментальные данные подвергались математической обработке вероятно-статическим методом.

На основе сравнения результатов определения содержания механических примесей в пробах воды можно прийти к выводу о том, что разработанное антинакипное устройство способствует большему выделению из теплообменной полости механических частиц на 0,012 мг в 300 мл воды. При сдуве котлов в период эксплуатации сливается объем воды $V = 50$ л. Для оценки эффективности антинакипного устройства полученный результат необходимо пересчитать по отношению к объему V , который будет составлять 2 мг.

Заключение (Conclusions)

Опытно-промышленное антинакипное устройство является новым аппаратом, отличительной особенностью которого является использование звукового генератора в сочетании с генератором ультразвуковых колебаний. Значение настраиваемой частоты зависит от типа котла и его элементов и необходимо его подбирать опытным путем. Длительность работы и периодичность включения звукового генератора также определяется в процессе эксплуатации котла в зависимости от амплитуды виброперемещения. При длительной вибрационной нагрузке с повышенными значениями амплитуд могут возникнуть проблемные вопросы с обеспечением надежности работы конструктивных элементов котла: обмуровки котла, уплотнительными соединениями, элементами крепления труб и т.д.

При частоте звуковых колебаний 50 Гц с длительностью 12 с и периодичностью включения через каждые 4 часа, распространяющихся по металлической конструкции котла и теплоносителю в сочетании с ультразвуковыми колебаниями установлен положительный эффект очистки внутренних поверхностей теплообменника, выразившейся в большом содержании механических частиц как в продувочной воде, так и на тестовой пластине. При этом состояние элементов котла оставалось в работоспособном состоянии, что свидетельствует о правильном подборе параметров работы вибратора. Для установления более корректных параметров звуковых колебаний как по амплитуде, так и по частоте и длительности их воздействия необходимо провести длительные и детальные испытания котла, в особенности при использовании устройства на других модификациях котлов.

По результатам проведенной работы был получен патент РФ №2789413 на изобретение по безреагентной обработке водных систем [13].

Литература

1. Производственная компания «Спецгазпром». Котельные установки. Доступно по: <https://www.specgazprom.ru/articles/stati-po-zhkh-i-kotelnomu-oborudovaniyu/kotelnye-ustanovki>. Ссылка активна на 26 февраля 2025.
2. Пономарева Д.С., Березина К.В. Предотвращение повреждений котельных труб / Сборник статей Международной научно-практической конференции «Научная инициатива: проблемы и перспективы внедрения инновационных решений», 15 августа 2023 г., СГТУ имени Гагарина Ю.А., Стерлитамак. Уфа: АМИ, 2023. С. 115-117.

3. Зарипов Ф.А., Павлов Г.И., Ситников О.Р., Накоряков П.В. О снижении влияния акустических колебаний на работу расходомеров в гидравлических системах энергетических установок // 7-я международная конференция «Динамика и виброакустика машин» (DVM'2024). 4-6 сентября 2024. Самара. 2024 IEEE. Доступно по: <https://repo.ssau.ru/handle/DVM-2022/444/simple-search?filterquery=Зарипов+Ф.+А.%2C+Павлов+Г.+И.%2C+Ситников+О.+Р.%2C+Накоряков+П.+В.&filtername=author&filtertype>equals>. Ссылка активна на 26 февраля 2025.
4. Стрельников А.С., Батухтин А.Г., Минаков А.А., Кобылкин М.В. Очистка поверхностей нагрева котлоагрегата // Сборник статей XIV Международной научно-практической конференции: «Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов». 26–28 ноября 2014 г., Чита : Заб. гос. ун-т, 2014. С. 155-161.
5. Овчинников Г.Л. Умягчение воды при водоподготовке. Специализированный ресурс Air Water Therm. Доступно по: <https://masters.donntu.ru/2019/fkita/burda/library/article03.htm>. Ссылка активна на 26 февраля 2025.
6. Дудочкин И.Б., Овчинников Я.В., Кухта М.В. Причины появления внутренних загрязнений в паровых и водогрейных котлах // Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки и техники», 7 апреля 2015 г., Самара. №2. С.162-164.
7. Васильева Л.В. Формирование элементного и фазового состава отложений в теплоэнергетическом оборудовании в условиях различных схем водоподготовки и способы их удаления. Дис. канд. хим. наук. Краснодар, 2017. 136с. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008711596>. Ссылка активна на 26 февраля 2025.
8. Николаевский Н.Н. Ультразвуковой метод предотвращения накипеобразования // Новости теплоснабжения. 2002. № 10(26). С. 44-45.
9. Терсбилов С.В., Михайлов А.Г., Слободина Е.Н., Васильев А.В. Образование отложений накипи на поверхностях нагрева в жаротрубных котлах // Омский научный вестник. 2017. №3(153). С.74-77.
10. Корюкин С.С. Исследование влияния ультразвука на выпадение накипи в теплообменном аппарате // Вестник науки и творчества. 2021. №5(65). С.40-42.
11. Глотов М.В., Позынич К.П., Захарычев С.П. Очистка от накипи теплотехнического оборудования и трубопроводов горячего водоснабжения термодинамически активированной водой // Вестник ТОГУ. 2017. №2(45). С.81-90.
12. Антропов Г.В., Трушина И.В. Применение ультразвука для предотвращения накипеобразования // Вестник СГТУ. 2007. №3(27), Вып.2. С.72-74.
13. Зарипов Ф.А., Павлов Г.И., Накоряков П.В., Кочергин А.В., Абраковнов А.П., Валеева К.А. Способ противонакипной обработки водогрейных и паровых котлов и устройство для его осуществления. Патент РФ на изобретение №2789413. 02.02.2023. Бюл. №4. Доступно по: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet. Ссылка активна на 26 февраля 2025.
14. Ларочкина Н.М., Дерунов А.Н., Данилов В.Н., Муравская И.И. Эффективные методы предупреждения аварий паровых котлов // Современная техника и технологии. 2016. №2 Доступно по: <https://technology.snauka.ru/2016/02/9535>. Ссылка активна на 26 февраля 2025.
15. Пирогов Г.В., Богловский А.В. Применение ультразвука для ограничения накипеобразования в теплосетях // Новости теплоснабжения. 2010. №2(114). С.41-43.
16. Ланин В.Л., Дежкунов Н.В., Томаль В.С. Приборное обеспечение измерения параметров ультразвуковых воздействий в технологических процессах // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. № 2. С.51-55.
17. Васильев А.А., Дромиади А.А., Иванов Д.С., Ирдынцев Г.Л., Толстой К.В. Межкристаллическая коррозия и ее развитие на основных элементах котла на примере парового двухбарабанного котла типа ДЕ-25-24-380-ГМО // Научные труды КубГТУ. 2015. №9. С. 1-8.
18. Елистратова Ю.В., Семенов А.С., Уваров В.А., Минко В.А. Влияние накипных отложений на температурный режим в каналах теплообменников пластинчатого типа // Вестник МГСУ. 2023. Т.18. Вып.5. С.737-746.

Авторы публикации

Павлов Григорий Иванович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Специальных технологий в образовании» (СТвО) Казанского национального исследовательского технического университет им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ). ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0825-0875>. Email: pavlov16@mail.ru

Ситников Олег Рудольфович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Специальных технологий в образовании» (СТвО) Казанского национального исследовательского

технического университет им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6138-3645>. Email: Halmer169990@mail.ru

Накоряков Павел Викторович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Специальных технологий в образовании» (СТВО) Казанского национального исследовательского технического университет им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ). Email: nakorjakov@mail.ru

References

1. Manufacturing company "Spetsgazprom". Boiler installations. Available at: <https://www.specgazprom.ru/articles/stati-po-zhkh-i-kotelnomu-oborudovaniyu/kotelnye-ustanovki>. Accessed: 26 Feb 2025. (In Russ).
2. Ponomareva D.S., Berezina K.V. Predotvrashchenie povrezhdenii kotel'nykh trub / Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchnaya initsiativa: problemy i perspektivy vnedreniya innovatsionnykh reshenii», 15 avgusta 2023 g., SGTU imeni Gagarina Yu.A., Sterlitamak. Ufa: AMI, 2023. S. 115-117.
3. Zaripov F.A., Pavlov G.I., Sitnikov O.R., Nakoryakov P.V. On reducing the impact of acoustic vibrations on the operation of flow meters in hydraulic systems of power plants // 7-th International conference «Dynamics and vibroacoustics of machines» (DVM'2024). 4-6 September 2024. Samara. 2024 IEEE. Available at: <https://repo.ssau.ru/handle/DVM-2022/444/simple-search?filterquery=Зарипов+Ф.+А.%2C+Павлов+Г.+И.%2C+Ситников+О.+Р.%2C+Накоряков+П.+В.&filtername=author&filtertype>equals>. Accessed: 26 Feb 2025. (In Russ).
4. Strel'nikov A.S., Batukhtin A.G., Minakov A.A., Kobylkin M.V. Ochistka poverkhnostei nagreva kotloagregata // Sbornik statei XIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: «Kulaginskie chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh protsessov». 26–28 noyabrya 2014 g., Chita : Zab. gos. un-t, 2014. S. 155-161.
5. Ovchinnikov G.L. Umyagchenie vody pri vodopodgotovke. Spetsializirovannyi resurs Air Water Therm. Available at: <https://masters.donntu.ru/2019/fkita/burda/library/article03.htm>. Accessed: 26 Feb 2025. (In Russ).
6. Dudochkin I.B., Ovchinnikov Ya.V., Kukhta M.V. Prichiny poyavleniya vnutrennikh zagryaznenii v parovykh i vodogreinykh kotlakh // Sbornik nauchnykh trudov po itogam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye voprosy nauki i tekhniki», 7 aprelya 2015 g., Samara. №2. S.162-164.
7. Vasil'eva L.V. Formirovanie elementnogo i fazovogo sostava otlozhenii v teploenergeticheskom oborudovanii v usloviyakh razlichnykh skhem vodopodgotovki i sposoby ikh udaleniya. Dis. kand. khim. nauk. Krasnodar, 2017. 136s. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008711596>. Accessed: 26 Feb 2025. (In Russ).
8. Nikolaevskii N.N. Ul'trazvukovoi metod predotvrashcheniya nakipeobrazovaniya // Novosti teplosnabzheniya. 2002. № 10(26). S. 44-45.
9. Terebilov S.V., Mikhailov A.G., Slobodina E.N., Vasil'ev A.V. Obrazovanie otlozhenii nakipi na poverkhnostyakh nagreva v zharotrubnykh kotlakh // Omskii nauchnyi vestnik. 2017. №3(153). S.74-77.
10. Koryukin S.S. Issledovanie vliyaniya ul'trazvuka na vypadenie nakipi v teploobmennom apparate // Vestnik nauki i tvorchestva. 2021. №5(65). S.40-42.
11. Glotov M.V., Pozynich K.P., Zakharychev S.P. Ochistka ot nakipi teplotekhnicheskogo oborudovaniya i truboprovodov goryachego vodosnabzheniya termodinamicheski aktivirovannoi vodoi // Vestnik TOGU. 2017. №2(45). S.81-90.
12. Antropov G.V., Trushina I.V. Primenenie ul'trazvuka dlya predotvrashcheniya nakipeobrazovaniya // Vestnik SGTU. 2007. №3(27), Vyp.2. S.72-74.
13. Zaripov F.A., Pavlov G.I., Nakoryakov P.V., Kochergin A.V., Abrakovnov A.P., Valeeva K.A. Sposob protivonakipnoi obrabotki vodogreinykh i parovykh kotlov i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya. Patent RUS №2789413. 02.02.2023. Byul. №4. Available at: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet. Accessed: 26 Feb 2025. (In Russ).
14. Larochkina N.M., Derunov A.N., Danilov V.N., Muravskaya I.I. Effektivnye metody preduprezhdeniya avarii parovykh kotlov // Sovremennaya tekhnika i tekhnologii. 2016. №2 Available at: <https://technology.snauka.ru/2016/02/9535>. Accessed: 26 Feb 2025. (In Russ).
15. Pirogov G.V., Boglovskii A.V. Primenenie ul'trazvuka dlya ogranicheniya nakipeobrazovaniya v teplosetyakh // Novosti teplosnabzheniya. 2010. №2(114). S.41-43.
16. Lanin V.L., Dezhkunov N.V., Tomal' V.S. Pribornoe obespechenie izmereniya parametrov ul'trazvukovykh vozdeistvii v tekhnologicheskikh protsessakh // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature. 2008. № 2. S.51-55.

17. Vasil'ev A.A., Dromiadi A.A., Ivanov D.S., Irdyncheev G.L., Tolstoi K.V. Mezhkristallicheskaya korroziya i ee razvitiye na osnovnykh elementakh kotla na primere parovogo dvukhbarabannogo kotla tipa DE-25-24-380-GMO // Nauchnye trudy KubGTU. 2015. №9. S. 1-8.

18. Elistratova Yu.V., Seminenko A.S., Uvarov V.A., Minko V.A. Vliyanie nakipnykh otlozhenii na temperaturnyi rezhim v kanalakh teploobmennikov plastinchatogo tipa // Vestnik MGSU. 2023. T.18. Vyp.5. S.737-746.

Authors of the publication

Grigory I. Pavlov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, Kazan, Russia. *ORCID:* <http://orcid.org/0000-0003-0825-0875>. *Email:* pavlov16@mail.ru

Oleg R. Sitnikov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, Kazan, Russia. *ORCID:* <http://orcid.org/0000-0002-6138-3645>. *Email:* Halmer169990@mail.ru

Pavel V. Nakoryakov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, Kazan, Russia. *Email:* nakorjakov@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **30.04.2025 г.**

Отредактировано **29.05.2025 г.**

Принято **18.06.2025 г.**



СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВАРИАНТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ

Р.Н. Валиев

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

valievkgeu@yandex.ru

Резюме: Тепловая сеть, которая выработала свой ресурс, нуждается в реконструкции. На этапе составления технического задания возникает необходимость в определении наиболее выгодного с точки зрения капитальных и эксплуатационных затрат варианта прокладки тепловой сети. В статье предложена и рассмотрена методика сравнения эффективности вариантов реконструкции тепловой сети, которая учитывает затраты на строительство и транспортировку теплоносителя, тепловые потери и потери с утечками в окружающую среду. Суть методики заключается в выборе и определении нескольких, наиболее значимых видов затрат и потерь для каждого из рассматриваемых вариантов реконструкции тепловой сети и последующем сравнении и сопоставлении их относительных значений по вариантам. Методика сочетает в себе определение нормативной цены строительства по укрупненным нормативам с расчетом тепловых сетей с использованием возможностей программного обеспечения ZuluThermo и MS Excel. Рассмотрена и рассчитана распределительная тепловая сеть и возможные варианты ее реконструкции. Для каждого варианта проведены: конструкторский расчет для определения диаметров трубопроводов на участках и наладочный расчет для определения расчетных значений характеристик тепловой сети. Выполнено сравнение эффективности вариантов. Наиболее эффективным является вариант с бесканальной прокладкой трубопроводов в битумоперлитной изоляции с насосным смешением у потребителя, но по причине того, что теплотрасса проходит через промышленную зону, к прокладке рекомендован чуть менее эффективный вариант реконструкции с надземной прокладкой трубопроводов на низких опорах в пенополиуретановой изоляции с насосным смешением у потребителя.

Ключевые слова: система теплоснабжения; тепловая сеть; реконструкция; затраты; выбор варианта; ZuluThermo.

Для цитирования: Валиев Р.Н. Сравнение эффективности вариантов реконструкции тепловой сети // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 135-146. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-135-146.

COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF OPTIONS FOR THE RECONSTRUCTION OF THE HEATING NETWORK

Valiev R.N.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

valievkgeu@yandex.ru

Abstract: The heating network of the heat supply system, which has exhausted its resource, needs reconstruction. At the stage of choosing the method of relaying the heating network, there is a need to determine the most profitable reconstruction option in terms of capital and operating costs. The article proposes a methodology based on the comparison and contrast of the most significant types of costs and losses during the life cycle of heat networks: during construction, during the transportation of heat carrier, in case of leaks of heat carrier and through thermal insulation. A comparative analysis of possible options based on relative performance indicators determined as a result of processing initial, standard and calculated data is carried out using ZuluThermo and MS Excel programs. The distribution heating network and possible options for its reconstruction are considered and calculated. For each option, a design calculation was carried out to determine the diameters of pipelines in the sections and an adjustment calculation to determine the calculated values of the

characteristics of the heating network. A comparison of the effectiveness of the options was performed. The most effective option is with duct-free piping in bitumen-perlite insulation with pumping mixing for the consumer, but due to the fact that the heating main passes through an industrial area, a slightly less efficient reconstruction option with above-ground piping on low supports in polyurethane foam insulation with pumping mixing for the consumer is recommended. The methodology can be used to substantiate the choice of the option for the reconstruction of the heat supply network.

Keywords: *heat supply system; heat network; reconstruction; costs; choice of option; ZuluThermo.*

For citation: Valiev R.N. Comparison of the efficiency of options for the reconstruction of the heating network. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (4): 135-146. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-135-146.

Введение (Introduction)

Одним из основных векторов развития теплоэнергетики в России является повышение экономической эффективности систем теплоснабжения и снижение затрат на их строительство и обслуживание. Этого можно достичь, если дальнейшее развитие систем теплоснабжения потребителей будет осуществляться на основе внедрения энергоэффективных и экономичных технологий и оборудования.

Цель работы заключается в выборе и определении нескольких, наиболее значимых видов затрат и потерь для каждого из рассматриваемых вариантов реконструкции тепловой сети и последующем сравнении и сопоставлении их относительных значений для определения наиболее эффективного варианта.

Актуальность выбранной темы определяется необходимостью масштабного обновления выработавших технический ресурс тепловых сетей. В статье [1] приведены данные, согласно которым износ трубопроводов в городе Казань составляет 55 %, в городе Набережные Челны 56 %, в городе Нижнекамске 80 %. Тепловые сети являются достаточно дорогостоящими сооружениями, на их строительство и эксплуатацию затрачиваются значительные средства и ранжирование вариантов реконструкции тепловых сетей по затратам и потерям на этапе реновации может помочь теплоснабжающим организациям сэкономить материальные и энергетические ресурсы в будущем. Эффективная работа систем централизованного теплоснабжения во многом зависит от правильного проектирования, строительства и технической эксплуатации.

Обзор литературы (Literature review)

Многие научные публикации посвящены повышению эффективности работы тепловых сетей. В статье [2] авторы обратили внимание на то, что на затраты при строительстве и эксплуатации тепловых сетей сильное влияние оказывает протяженность тепловых сетей, определяемая планировкой городских территорий. В статье [3] при сравнении вариантов схем теплоснабжения авторы пришли к выводу, что точность решения задачи оптимизации зависит от правильного выбора оптимизируемых параметров и используемых весовых коэффициентов. В статье [4] предложено решение проблемы выбора оптимального маршрута для строительства сети теплоснабжения с большим количеством соединений, разработаны критерии, которые позволяют определить интегральные показатели такой сети, отмечена важность применения масштабирования и весовых коэффициентов. В статье [5] описан пример совместного использования ZuluGIS и MS Excel для анализа эффективности перевода Омских тепловых сетей на более низкий температурный график. В статье [6] и статье [7] на примере Омской тепловой сети показано, как объединив геоинформационную систему и модель прогнозирования спроса на энергию, создать эффективный и чувствительный к изменениям инструмент для принятия обоснованных решений по повышению качества теплоснабжения. В статье [8] предложена и апробирована методика определения основных факторов, влияющих на экономическую эффективность сетей централизованного теплоснабжения на основе сравнительного анализа по эталонным показателям, в качестве которых авторами выбраны длина и пропускная способность тепловых сетей. Методика предназначена для использования при строительстве новых и реконструкции существующих сетей централизованного теплоснабжения. В статье [9] для исключения ошибок при выборе теплотрассы предлагается использовать объединяющий отдельные показатели векторный критерий, который зависит от материальной характеристики, тепловой нагрузки, тепловых потерь,

показателя надежности и конструктивных особенностей тепловой сети. В статье [10] описан программный продукт динамического моделирования систем централизованного теплоснабжения, разработанный на базе программного обеспечения MatLab, который позволяет оценивать и оптимизировать энергетические, экологические и экономические показатели стандартных и инновационных систем централизованного теплоснабжения с учетом наиболее важных проектных и эксплуатационных параметров, приведен пример динамического моделирования. Авторами статьи [11] предложены зависимости для проведения предпроектного анализа систем теплоснабжения, позволяющие найти нормативные значения показателей плотности тепловой нагрузки на единицу площади района теплоснабжения и на единицу протяженности трубопроводов. Проведенные исследования показали, что чем ниже значение плотности тепловой нагрузки на единицу площади района теплоснабжения, тем выше удельная стоимость выработки, распределения и передачи тепла. Авторы статьи [12] в своей работе рассмотрели математическую модель кольцевой системы теплоснабжения с несколькими источниками тепла, основанную на соблюдении требований по ограничению теплоснабжения в аварийных условиях. Использование этой модели позволяет проверить работоспособность системы теплоснабжения на разных режимах работы. В статье [13] представлены результаты сравнительного исследования вариантов теплоснабжения зданий с пониженным теплоснабжением, из которых следует, что в городских условиях варианты с сетями централизованного теплоснабжения в большинстве случаев имеют наименьшую стоимость, а индивидуальное теплоснабжение наибольшую. В [14] статье авторы предложили методику для оценки эффективности систем теплоснабжения, на основе весовых коэффициентов, которые будут, определяться отдельными группами экспертов по каждому учитываемому в методике удельному показателю. В результате суммирования удельных показателей с учетом весовых коэффициентов формируется единый числовой показатель определяющий, насколько система теплоснабжения соответствует требованиям экспертов. Методика подходит для оценки эффективности, как отдельного участка тепловой сети, так и всей системы теплоснабжения в целом. В статье [15] авторами предложена методика определения наиболее выгодного варианта трассировки тепловой сети на основе решения многокритериальной задачи, определены критерии оптимальности, разработана программа для расчета оптимального маршрута теплосети и приведен пример работы программы при ограниченном количестве исходных данных.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для анализа вариантов реконструкции тепловых сетей использован метод, основанный на расчетном моделировании вариантов реконструкции тепловой сети в ZuluThermo с последующей обработкой результатов в MS Excel. ZuluThermo - программное обеспечение и вычислительный инструмент для быстрого описания, расчета и анализа работы тепловых сетей с использованием вычислительных возможностей компьютеров, планшетов и смартфонов. Рабочей платформой для ZuluThermo является геоинформационная система ZuluGIS, в которой можно на постоянной основе отслеживать уровень урбанизации любой территории.

Для определения капитальных затрат в строительство тепловых сетей использована нормативная цена строительства тепловых сетей (далее по тексту НЦС), которая определяется на основе данных из сборника нормативных цен на строительство тепловых сетей¹ (далее по тексту НТД с НЦС).

НЦС представляет собой сумму денег, которую нужно потратить на то, чтобы создать наружную тепловую сеть. НЦС учитывает финансовые затраты на проектирование и экспертизу, строительство и надзор и другие необходимые для строительства тепловых сетей расходные статьи. Основное назначение НЦС: предварительное планирование смет; формирование инвестиционных предложений; контроль эффективности расходования средств. К сожалению, данные по НЦС тепловых сетей, представленные в НТД с НЦС охватывают далеко не весь перечень возможных технологических решений, и это ограничивает область применения методики. Например, в НТД с НЦС отсутствует информация по вариантам прокладки тепловых сетей в армопенобетонной (АПБ) и пенополимерминеральной (ППМ) изоляции.

Данные по НЦС, приведенные к размерности тыс. руб/м, представлены на рис. 1. Для учета территориального расположения объекта к данным при расчетах необходимо

¹ Стандарты цен на строительство РФ «НТС 81-02-13-2024 Сборник N 13. Наружные тепловые сети» от 26.02.2024 Том 81-02-13-2024.

¹ Construction price standards of the Russian Federation «NTS 81-02-13-2024 Assemblage N 13. External heating networks» of 26.02.2024 Volume 81-02-13-2024.

применять поправочный коэффициент, который в нашем случае равен 0,94.

Суть предлагаемой методики заключается в выборе и определении нескольких, наиболее значимых видов потерь и затрат для каждого из рассматриваемых вариантов реконструкции тепловой сети и последующем сравнении и сопоставлении их относительных значений по вариантам. Варианты реконструкции тепловых сетей в основном отличаются друг от друга типом и видом прокладки тепловой сети и способом подключения потребителей. Для сравнения вариантов реконструкции тепловой сети определяются значения следующих характеристик тепловых сетей:

1) расчетная нормативная цена строительства тепловых сетей, как показатель капитальных затрат;

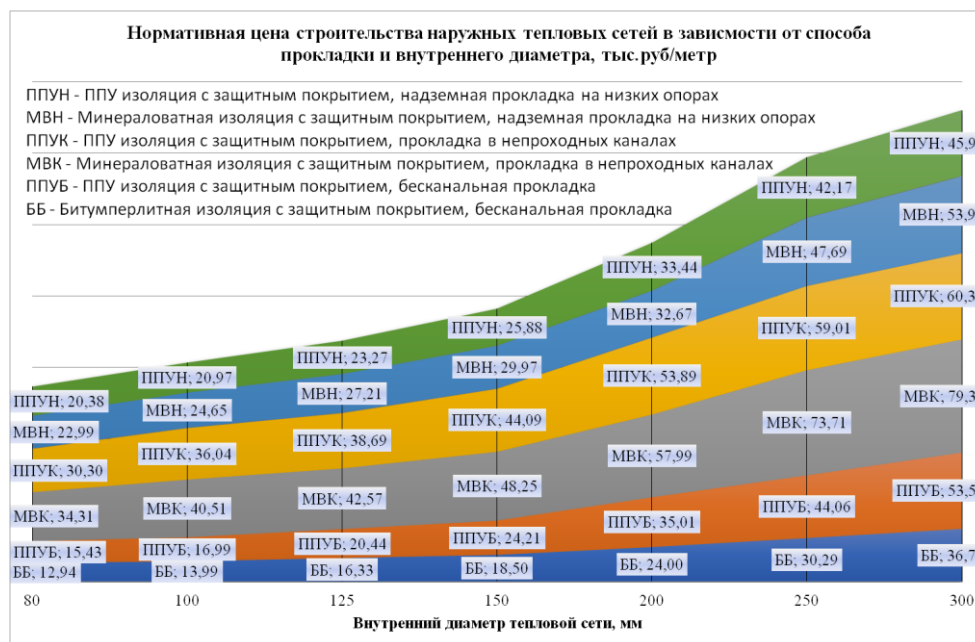


Рис. 1. НЦС наружных тепловых сетей для города Москвы, без учета поправочных коэффициентов

Fig. 1. NCS of external heating networks for the city of Moscow, without taking into account the correction factors

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

- 2) расчетные нормативные потери теплоты, как показатель эксплуатационных затрат;
- 3) расчетные нормативные потери теплоносителя с утечками, как показатель эксплуатационных затрат;
- 4) расчетные затраты электрической энергии на транспортировку теплоносителя, как показатель эксплуатационных затрат.

Расчетное моделирование в ZuluThermo предлагается проводить в следующем порядке. Сначала на специальном расчетном слое рисуется схема тепловой сети и вводится исходная информация в базы данных слоя, т.е. создается расчетная модель.

Затем производятся необходимые расчеты, определяются и анализируются материальные и эксплуатационные характеристики для всех возможных вариантов реконструкции тепловой сети.

Для быстрого сравнения и сопоставления, различных по своей природе характеристик применяется бенчмаркинг по относительным значениям. Для каждой рассматриваемой в методике характеристики, из всех возможных вариантов реконструкции определяется вариант с наибольшим значением этой характеристики, которому присваивается относительное значение характеристики равное 1 или 100 %. Остальные относительные значения характеристик по вариантам определяются пересчетом и попадают в диапазон значений от 0 до 1 или от 0 до 100 %.

После определения относительных значений каждой характеристики производится их сложение (или усреднение) по каждому варианту. Затем из возможных вариантов реконструкции выбирается вариант с наибольшим значением суммы (или среднего) относительных значений его характеристик, которому присваивается значение обобщенного относительного показателя равное 100 % или 1. Значения обобщенных относительных показателей для остальных вариантов после пересчета попадают в диапазон значений от 0 до 1 или от 0 до 100 %.

Пригодными для выбора считаются варианты, которые имеют наименьшее или близкое к нему значение обобщенного относительного показателя и которые соответствуют техническим условиям и нормативным требованиям, предъявляемым к тепловой сети. Эксперт, осуществляющий выбор, может обоснованно отклонить вариант с наименьшим значением обобщенного относительного показателя, как и любые другие рассмотренные варианты, если по ним не соблюдаются технические условия или нормативные требования. Лучше всего проверить сравниваемые варианты на соответствие условиям и требованиям заранее.

Результаты и обсуждение (Results and discussion)

В качестве объекта исследования выбрана распределительная тепловая сеть, которая выработала свой ресурс и требует перекладки при условии сохранения прежней трассировки. Располагаемый напор в точке подключения распределительной тепловой сети к тепловоду ТЭЦ составляет 54 м.в.ст. Температурный график в тепловом от ТЭЦ 150/70 со срезкой на уровне 130 °С и полкой на уровне 70 °С.

Схема расчетной модели распределительной тепловой сети, составленная по исходным данным в программном обеспечении ZuluThermo, представлена на рис.2.

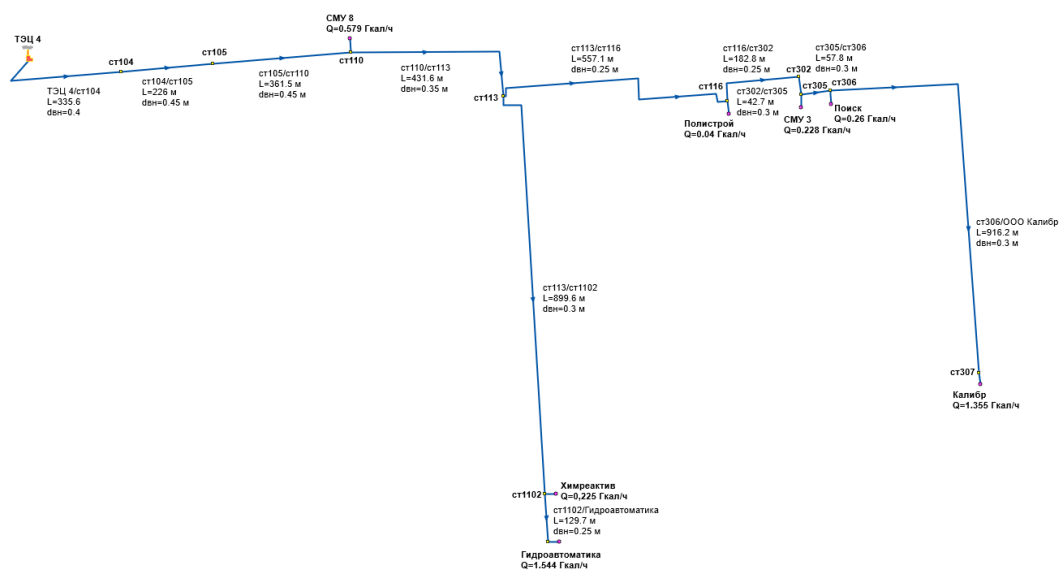


Рис. 2. Принципиальная схема расчетной модели тепловой сети

Fig. 2. Schematic diagram of the calculation model of the heating network

Расчетное моделирование тепловой сети выполнено для семи вариантов прокладки тепловых сетей. Выполнялись два вида расчетов: конструкторский, для определения диаметров трубопроводов на участках и наладочный, для определения расчетных значений характеристик реконструируемой тепловой сети.

Результаты расчетов по вариантам представлены в таблице 1.

Расчеты производились поэтапно. На первом этапе был рассчитан исходный, нулевой вариант тепловой сети. На последующих шести этапах в базы данных ZuluThermo вносились изменения в соответствии с выбранным вариантом реконструкции тепловой сети, и производился перерасчет на новых условиях. Нулевой вариант (ЭС 1989 ИД Н) рассчитан по следующим исходным данным: элеваторное смешение у потребителя; теплопотери по нормам до 1989 года; исходные диаметры; надземная прокладка на низких опорах. Остальные 6 вариантов рассчитаны в следующих конфигурациях:

1 вариант (ЭС 2004 ОД Н) – элеваторное смешение у потребителя; теплопотери по нормам после 2004; диаметры из конструкторского расчета; надземная прокладка на низких опорах.

2 вариант (ЭС 2004 ОД К) – элеваторное смешение у потребителя; теплопотери по нормам после 2004 года; диаметры из конструкторского расчета; канальная прокладка.

3 вариант (ЭС 2004 ОД Б) – элеваторное смешение у потребителя; теплопотери по нормам после 2004 года; диаметры из конструкторского расчета; бесканальная прокладка.

4 вариант (НС 2004 ОД Н) – насосное смешение у потребителя; теплопотери по нормам после 2004 года; диаметры из конструкторского расчета; надземная прокладка на низких опорах.

5 вариант (НС 2004 ОД К) – насосное смешение у потребителя; теплотери по нормам после 2004 года; диаметры из конструкторского расчета; канальная прокладка.

6 вариант (НС 2004 ОД Б) – насосное смешение у потребителя; теплотери по нормам после 2004 года; диаметры из конструкторского расчета; бесканальная прокладка.

По результатам расчета, в нулевом варианте распределительная тепловая сеть работает в режиме аккумулятора теплоты, потому что из-за несоответствия тепловых нагрузок и пропускной способности трубопроводов скорость движения теплоносителя на участках получается очень низкая. В остальных вариантах тепловая сеть работает в режиме циркуляции с потерями давления в районе 100 Па/м. Располагаемый напор в точке подключения распределительных тепловых сетей к тепловоду ТЭЦ определяется потерями давления на участках и у потребителей.

Таблица 1

Table 1

Результаты расчетного моделирования в ZuluThermo

Results of computational modeling in ZuluThermo

Характеристика	Ед. изм.	ЭС 1989 ИД Н	ЭС 2004 ОД Н	ЭС 2004 ОД К	ЭС 2004 ОД Б	НС 2004 ОД Н	НС 2004 ОД К	НС 2004 ОД Б
Номер варианта		0	1	2	3	4	5	6
Количество тепла, вырабатываемое на источнике	Гка л/ч	13,050	11,834	11,582	11,768	11,834	11,582	11,768
Тепловые потери в подающем трубопроводе	Гка л/ч	1,01404	0,38575	0,28752	0,41893	0,38575	0,28752	0,41893
Тепловые потери в обратном трубопроводе	Гка л/ч	0,78049	0,27739	0,12290	0,17890	0,27739	0,12290	0,17890
Потери тепла от утечек в подающем трубопроводе	Гка л/ч	0,10069	0,03332	0,03338	0,03329	0,03332	0,03339	0,03329
Потери тепла от утечек в обратном трубопроводе	Гка л/ч	0,05294	0,01781	0,01796	0,01791	0,01781	0,01796	0,01791
Потери тепла от утечек в системах теплоснабжения	Гка л/ч	0,05456	0,05451	0,05451	0,05450	0,05451	0,05452	0,05450
Суммарный расход в подающем трубопроводе	т/ч	201,026	191,059	189,445	191,600	191,059	189,445	191,600
Суммарный расход в обратном трубопроводе	т/ч	198,510	189,678	188,064	190,220	189,678	188,064	190,220
Суммарный расход на подпитку	т/ч	2,516	1,381	1,381	1,381	1,381	1,381	1,381
Расход воды на утечки из подающего трубопровода	т/ч	0,84297	0,27528	0,27528	0,27528	0,27528	0,27528	0,27528
Расход воды на утечки из обратного трубопровода	т/ч	0,84297	0,27528	0,27528	0,27528	0,27528	0,27528	0,27528
Расход воды на утечки из систем теплоснабжения	т/ч	0,83003	0,83002	0,83003	0,83003	0,83002	0,83003	0,83002
Давление в подающем трубопроводе	м	34,000	69,900	68,800	69,900	56,100	54,900	56,200
Давление в обратном трубопроводе	м	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000
Располагаемый напор	м	22,000	57,900	56,800	57,900	44,100	42,900	44,200
Температура в подающем трубопроводе	°С	130,000	130,000	130,000	130,000	130,000	130,000	130,000
Температура в обратном трубопроводе	°С	65,842	68,522	69,334	69,042	68,522	69,334	69,042
Потребляемая электрическая мощность, кВт	кВт	19,80	49,52	48,17	49,66	37,72	36,38	37,91

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

Примечание: ЭС и НС – элеваторное или насосное смешение, 1989 и 2004 – методика расчета нормативных тепловых потерь до 1989 и после 2004; ИД и ОД – исходные диаметры трубопроводов и диаметры из конструкторского расчета; Н, К, Б – способы прокладки: канальный,

бесканальный или надземный.

Note: ES and NS – elevator or pump mixing, 1989 and 2004 – methods for calculating standard heat losses before 1989 and after 2004; ID and OD – initial pipeline diameters and diameters from design calculations; N, K, B – installation methods: channel, channelless or aboveground.

В вариантах 1, 2 и 3 с гидроэлеваторами и «конструкторскими» оптимизированными диаметрами, расчетный располагаемый напор в точке подключения к тепловоду ТЭЦ незначительно превышает фактический, равный 54 м.в.ст (см. рис. 3). В вариантах 4, 5 и 6 с насосным смешением и оптимизированными диаметрами, наоборот имеется запас располагаемого напора (см. рис. 4).

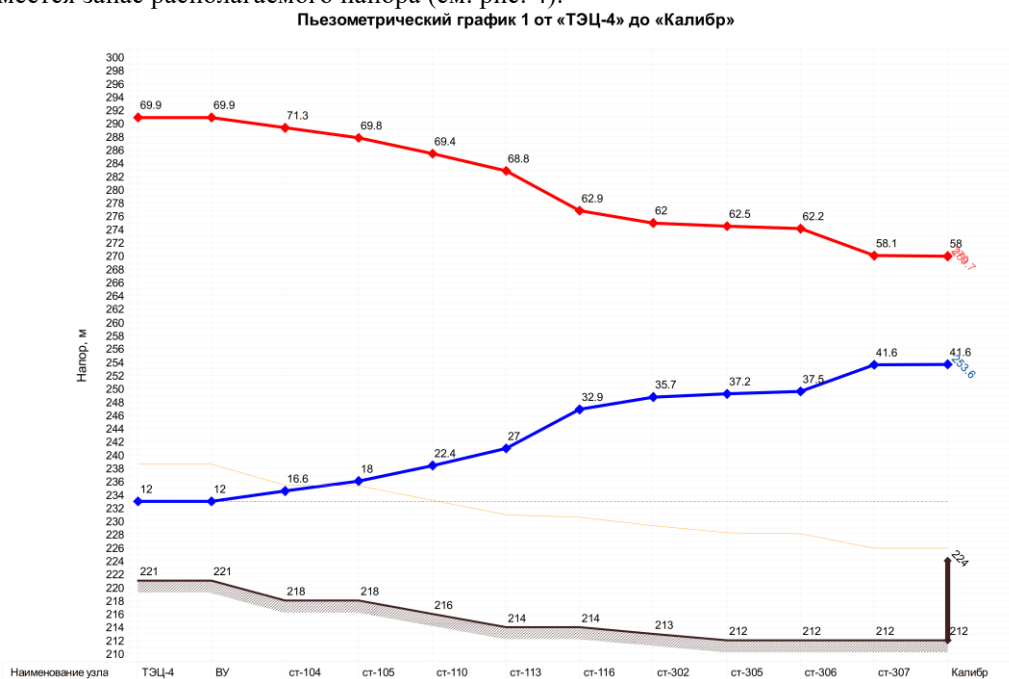


Рис.3. Пьезометрический график для варианта с элеваторным смешением Fig. 3. Piezometric graph for the variant with elevator mixing

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

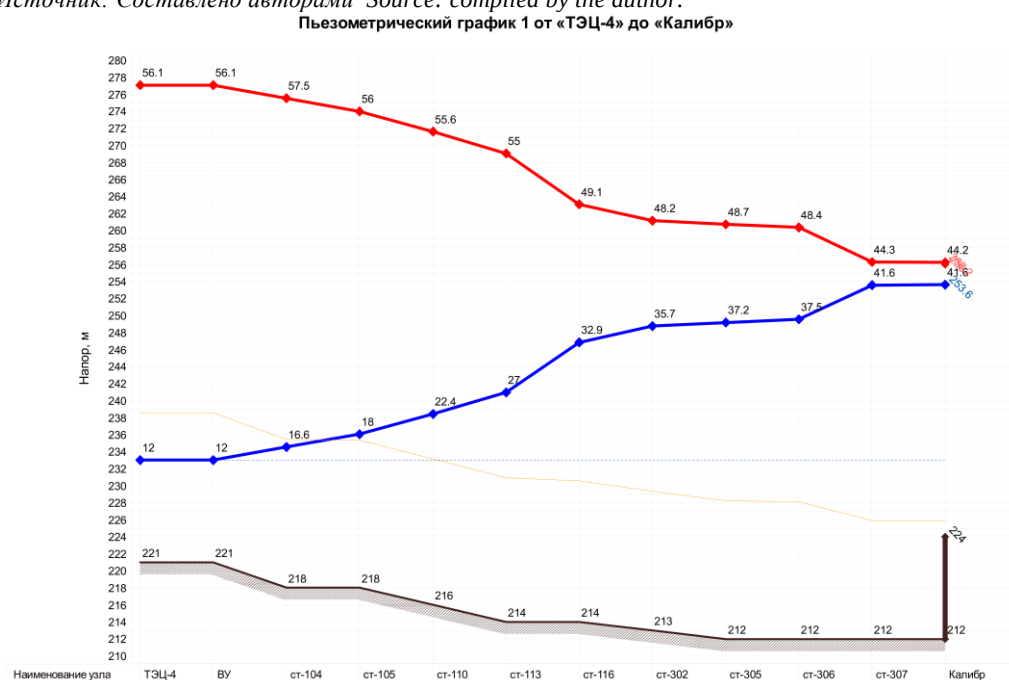


Рис.4 Пьезометрический график для варианта с насосным смешением Fig.4 Piezometric graph for the variant with pump mixing

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

Относительные значения НЦС, как характеристики капитальных затрат с учетом способа прокладки и трассировки приведены на диаграмме на рис. 5. Относительные

значения трех эксплуатационных характеристик по каждому варианту представлены на диаграммах на рис.6-8.

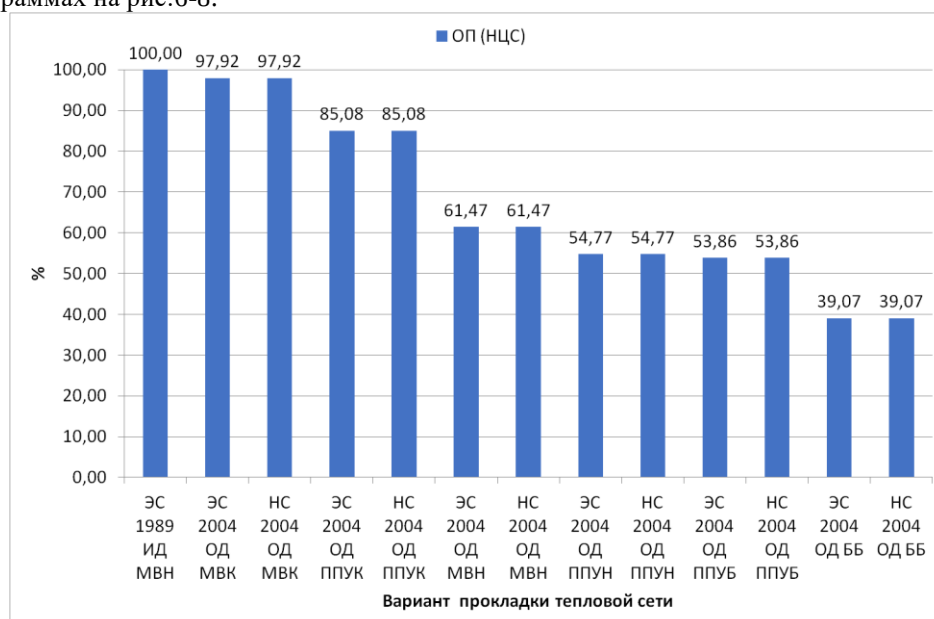


Рис. 5. Относительные значения потерь НТС по вариантам (ОП (НТС))

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

Наиболее дорогой в строительстве является надземная прокладка для исходного (нулевого) варианта теплоснабжения, главным образом из-за использования больших, чем у других вариантов диаметров трубопроводов на участках. Далее по порядку убывания затрат идут варианты с оптимизированными диаметрами: канальная (К), надземная на низких опорах (Н) и бесканальная на глубине до 2 метров (Б) с использованием минераловатной (МВ), пенополиуретановой (ППУ) и битумоперлитной теплоизоляции (Б). Наиболее дорогой является канальная прокладка в минераловатной теплоизоляции, наиболее дешевой бесканальная с битумоперлитной теплоизоляцией. По экономичности затрат в строительство лидируют варианты бесканальной прокладки ББ, ППУ и надземной ППУ. Схема подключения потребителей, элеваторная или насосная на относительное значение НТС прямого влияния не оказывает, так не входит в стоимость работ. На НТС в основном влияет материальная характеристика и способ прокладки тепловой сети.

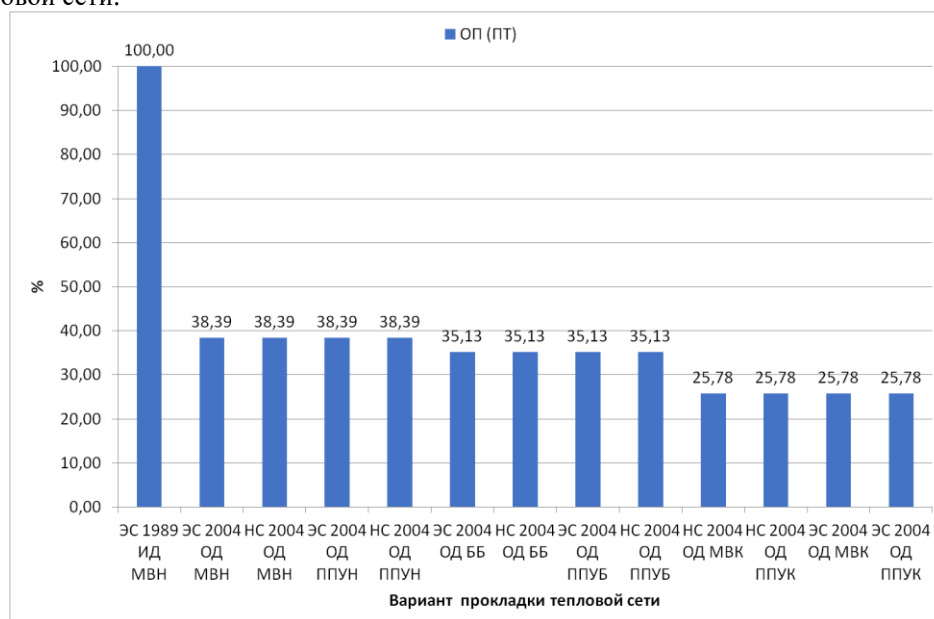


Рис.6. Относительные значения тепловых потерь по вариантам (ОП (ПТ))

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

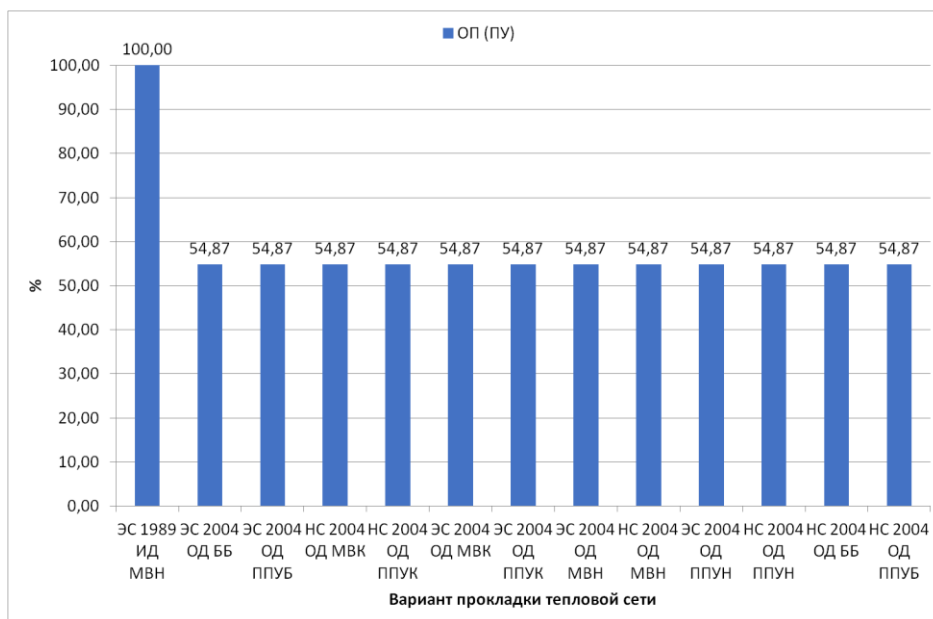


Рис.7. Относительные значения потерь с утечками по вариантам (ОП (ПУ)) *Fig.7. Relative values of leakage losses by variants (OP (PU))*

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

У оптимизированных по диаметрам вариантов теплопотери получились значительно меньше, чем у базового варианта, что объясняется разницей в нормативах, по которым проектировалась тепловая изоляция до 1989 и после 2004 года и различием в диаметрах трубопроводов. Влияние на теплопотери в тепловой сети оказывают материальная характеристика, способ прокладки и величина утечек. По тепловой эффективности среди способов прокладки на первом месте находится канальная, на втором бесканальная и на третьем надземная прокладка. Схема подключения потребителей на теплопотери прямого влияния не оказывает.

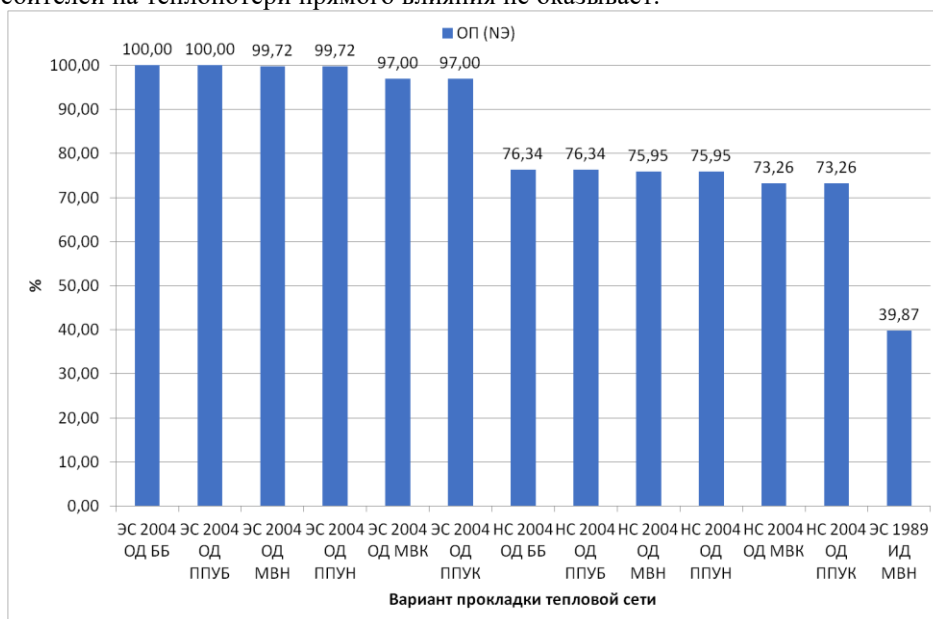


Рис.8. Относительные значения затрат электроэнергии по вариантам (ОП (НЭ)) *Fig8. Relative values of electricity costs by options (OP (NE))*

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

Затраты электроэнергии на циркуляцию теплоносителя в базовом варианте сильно меньше чем у других из-за несоответствия, между пропускной способностью трубопроводов и расходами теплоносителя, вода движется очень медленно. Большие затраты электроэнергии в вариантах с гидроэлеваторами, по сравнению с вариантами с насосным смешением наблюдаются из-за необходимости поддержания на входах у потребителей необходимого для работы гидроэлеваторов располагаемого напора. Схема подключения потребителей оказывает прямое влияние на затраты электроэнергии на циркуляцию теплоносителя. Также на затраты электроэнергии оказывает прямое влияние

пропускная способность трубопроводов, расход теплоносителя и наличие дополнительных сопротивлений.

Обобщенные относительные показатели по всем вариантам представлены на рисунке 9.

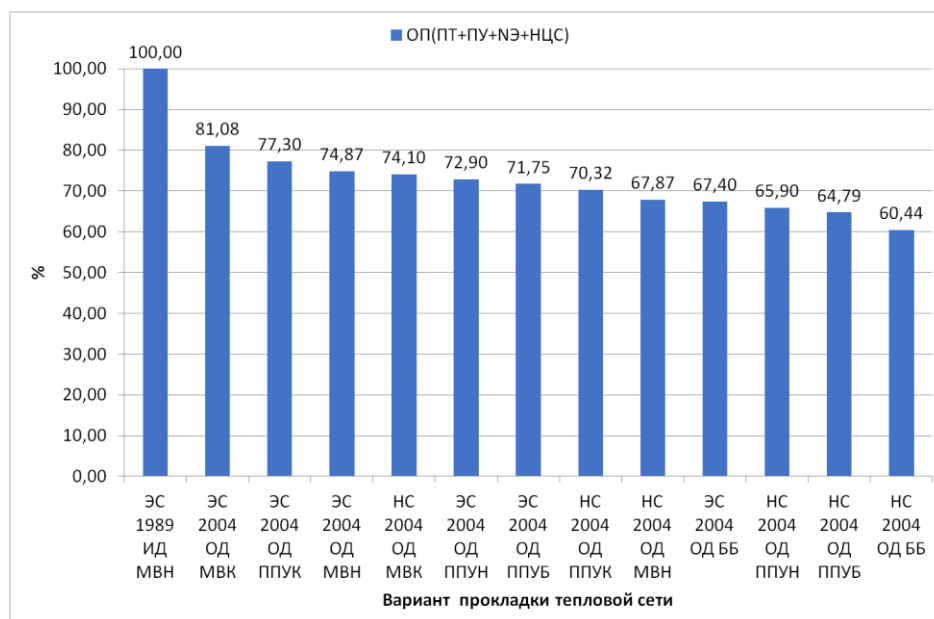


Рис. 9. Обобщенные относительные показатели затрат и потерь по вариантам *Fig. 9. Generalized relative indicators of costs and losses by options*

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

Наиболее эффективным по значению обобщенного относительного показателя вариантом реконструкции тепловых сетей является вариант бесканальной прокладки трубопроводов в битумоперлитной изоляции с насосным смешением, затем идут варианты бесканальной и надземной прокладки в пенополиуретановой изоляции с насосным смешением и замыкают пятерку лидеров варианты бесканальной прокладки трубопроводов в битумоперлитной изоляции с элеваторным смешением и надземной прокладки в минераловатной изоляции с насосным смешением. Вариант канальной прокладки в пенополиуретановой изоляции с насосным смешением занимает шестое место. Наиболее эффективным является вариант с бесканальной прокладкой трубопроводов в битумоперлитной изоляции с насосным смешением у потребителя, но по причине того, что теплотрасса проходит через промышленную зону, к прокладке рекомендован вариант реконструкции с надземной прокладкой трубопроводов на низких опорах в пенополиуретановой изоляции с насосным смешением у потребителя.

Ограничения при использовании методики. Перечень доступных для рассмотрения с использованием методики способов прокладки тепловых сетей ограничен способами, приведенными в НТД с НЦС. При реконструкции и строительстве тепловых сетей следует учитывать, что существующая инфраструктура в выделенной полосе отвода строительства (надземные и подземные сооружения и коммуникации, дорожные покрытия и зеленые зоны), а также неблагоприятные условия (погодные, геологические, гидрологические, антропогенные факторы и блуждающие токи) могут потребовать дополнительных затрат.

Закключение (Conclusion)

Рассмотрена и рассчитана распределительная тепловая сеть и возможные варианты ее реконструкции. Для каждого варианта проведены: конструкторский расчет, для определения диаметров трубопроводов на участках и наладочный расчет, для определения расчетных значений характеристик тепловой сети. Предложена и рассмотрена методика сравнения эффективности вариантов реконструкции тепловой сети, которая учитывает затраты на строительство и транспортировку теплоносителя, тепловые потери и потери с утечками в окружающую среду. Выполнено сравнение эффективности вариантов, определен наиболее эффективный вариант и вариант который рекомендован к прокладке.

Литература

1. Совершенствование системы централизованного теплоснабжения: анализ и предложения по повышению надежности / И. Г. Ахметова, А. Я. Сабирзанов, А. Р. Нурисламова, Д. Т. Ахметов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2025. – Т. 17, № 1(65). – С. 71-79.
2. Влияние планировки функциональных зон городов на развитие систем теплоснабжения / В. Н. Мелькумов, С. Н. Кузнецов, С. Г. Тульская, А. А. Чуйкина // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2019. – № 1(53). – С. 116-123. – DOI 10.25987/VSTU.2019.53.1.011.
3. Критерии оптимальности и условия сравнения проектных решений систем теплоснабжения / В. Н. Мелькумов, К. А. Скляров, С. Г. Тульская, А. А. Чуйкина // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2017. – № 4(48). – С. 29-37.
4. Лобода, А. В. Проектирование трасс систем теплоснабжения на основе системного анализа / А. В. Лобода, А. А. Чуйкина // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2019. – № 3(55). – С. 11-20. – DOI 10.25987/VSTU.2019.55.3.001.
5. Comparing strategies for improving thermal performance of an existing district heating (DH) network: low temperature DH in Omsk, Russia / S. Chicherin, L. Junussova, T. Junussov, C. Junussov // E3s web of conferences, Barcelona, Spain, 23 апреля 2020 года. Vol. 173. – Barcelona, Spain: EDP Sciences, 2020. – P. 03001. – DOI 10.1051/e3sconf/202017303001.
6. Method for assessing heat loss in a district heating network with a focus on the state of insulation and actual demand for useful energy / S. Chicherin, V. Mašatin, A. Siirde, A. Volkova // Energies. – 2020. – Vol. 13, No. 17. – P. en13174505. – DOI 10.3390/en13174505.
7. Chicherin, S. GIS-based optimisation for district heating network planning / S. Chicherin, A. Volkova, E. Latdšov // Energy Procedia : 16, Hamburg, 09–12 сентября 2018 года. – Hamburg, 2018. – P. 635-641. – DOI 10.1016/j.egypro.2018.08.228.
8. District heating networks: enhancement of the efficiency / U. Sarma, U. Sarma, G. Karnitis, J. Zutters, E. Karnitis // Insights into Regional Development. – 2016. – Vol. 1(3). – P. 200-213. – DOI 10.9770/ird.2019.1.3(2).
9. Solving the multi-criteria optimization problem of heat energy transport / V. Melkumov, S. Tulskeya, A. Chuykina, V. Dubanin // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1258. – P. 3-10. – DOI 10.1007/978-3-030-57450-5_1.
10. Novel dynamic simulation model for the thermo-economic analysis and optimisation of district heating systems / G. Barone, A. Buonomano, A. Palombo, C. Forzano // Energy Conversion and Management. – 2020. – Vol. 220. – P. 113052. – DOI 10.1016/j.enconman.2020.113052.
11. Stennikov, V. A. Optimal planning of heat supply systems in urban areas / V. A. Stennikov, E. E. Iakimets // Energy. – 2016. – Vol. 110. – P. 157-165. – DOI 10.1016/j.energy.2016.02.060.
12. Connection Method between Urban Heat-supply Systems Based on Requirement of Limited-heating / T. Ye, Z. Zhigang, W. Zhaojun. // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 146. – P. 386-393. – DOI 10.1016/j.proeng.2016.06.417.
13. Cost-efficiency of urban heating strategies – Modelling scale effects of low-energy building heat supply / A. F. Sandvall, E. O. Ahlgren, T. Ekvall // Energy Strategy Reviews. – 2017. – Vol. 18. – P. 212-223. – DOI doi.org/10.1016/j.esr.2017.10.003.
14. Третьякова, П. А. Критерии оценки эффективности системы теплоснабжения / П. А. Третьякова // Энергосбережение и водоподготовка. – 2023. – № 2(142). – С. 64-68.
15. Чуйкина, А. А. Разработка методики и программы расчёта оптимального маршрута трубопроводной трассы системы теплоснабжения / А. А. Чуйкина, О. А. Сотникова // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2021. – № 4 (232). – С. 46-48.

Авторы публикации

Валиев Радик Нурттинович – доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» Казанского государственного энергетического университета». E-mail: valievkgeu@yandex.ru.

References

1. Sovershenstvovaniye sistemy tsentralizovannogo teplosnabzheniya: analiz i predlozheniya po povysheniyu nadezhnosti / I. G. Akhmetova, A. Y. Sabirzanov, A. R. Nurislamova, D. T. Akhmetov // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. – 2025. – T. 17, № 1(65). – S. 71-79.
2. Influence of the layout of functional zones of cities on the development of heat supply systems / V. N. Mel'kumov, S. N. Kuznetsov, S. G. Tul'skaya, A. A. Chuikina // Russian Journal of Building

- Construction and Architecture. – 2019. – No. 2(42). – P. 85-92. – DOI 10.25987/VSTU.2019.42.2.009.
3. Criteria of Optimality and Condition of the Comparison of Design Solutions of Systems of Heat Supply / V. N. Mel'kumov, K. A. Sklyarov, S. G. Tul'skaya, A. A. Chuikina // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2018. – No. 1(37). – P. 18-28.
4. Loboda, A. V. Proyektirovaniye trass sistem teplosnabzheniya na osnove sistemnogo analiza / A. V. Loboda, A. A. Chuykina // Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury. – 2019. – № 3(55). – S. 11-20. – DOI 10.25987/VSTU.2019.55.3.001.
5. Comparing strategies for improving thermal performance of an existing district heating (DH) network: low temperature DH in Omsk, Russia / S. Chicherin, L. Junussova, T. Junussov, C. Junussov // E3s web of conferences, Barcelona, Spain, 23 апреля 2020 года. Vol. 173. – Barcelona, Spain: EDP Sciences, 2020. – P. 03001. – DOI 10.1051/e3sconf/202017303001.
6. Method for assessing heat loss in a district heating network with a focus on the state of insulation and actual demand for useful energy / S. Chicherin, V. Mašatin, A. Siirde, A. Volkova // Energies. – 2020. – Vol. 13, No. 17. – P. en13174505. – DOI 10.3390/en13174505.
7. Chicherin, S. GIS-based optimisation for district heating network planning / S. Chicherin, A. Volkova, E. Latõšov // Energy Procedia : 16, Hamburg, 09–12 сентября 2018 года. – Hamburg, 2018. – P. 635-641. – DOI 10.1016/j.egypro.2018.08.228.
8. District heating networks: enhancement of the efficiency / U. Sarma, U. Sarma, G. Karnitis, J. Zutens, E. Karnitis // Insights into Regional Development. – 2016. – Vol. 1(3). – P. 200-213. – DOI 10.9770/ird.2019.1.3(2).
9. Solving the multi-criteria optimization problem of heat energy transport / V. Melkumov, S. Tul'skaya, A. Chuykina, V. Dubanin // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1258. – P. 3-10. – DOI 10.1007/978-3-030-57450-5_1.
10. Novel dynamic simulation model for the thermo-economic analysis and optimisation of district heating systems / G. Barone, A. Buonomano, A. Palombo, C. Forzano // Energy Conversion and Management. – 2020. – Vol. 220. – P. 113052. – DOI 10.1016/j.enconman.2020.113052.
11. Stennikov, V. A. Optimal planning of heat supply systems in urban areas / V. A. Stennikov, E. E. Iakimetc // Energy. – 2016. – Vol. 110. – P. 157-165. – DOI 10.1016/j.energy.2016.02.060.
12. Connection Method between Urban Heat-supply Systems Based on Requirement of Limited-heating. / Tian, Ye & Zhou, Zhigang & Wang, Zhaojun. // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 146. – P. 386-393. – DOI 10.1016/j.proeng.2016.06.417.
13. Cost-efficiency of urban heating strategies – Modelling scale effects of low-energy building heat supply / A.F. Sandvall, E. O. Ahlgren, T. Ekvall // Energy Strategy Reviews. – 2017. – Vol. 18. – P. 212-223. – DOI doi.org/10.1016/j.esr.2017.10.003.
14. Tret'yakova, P. A. Kriterii otsenki effektivnosti sistemy teplosnabzheniya / P. A. Tret'yakova // Energobezopasnost' i vodopodgotovka. – 2023. – № 2(142). – S. 64-68.
15. Chuykina, A. A. Razrabotka metodiki i programmy raschota optimal'nogo marshruta truboprovodnoy trassy sistemy teplosnabzheniya / A. A. Chuykina, O. A. Sotnikova // Santechnika, Otopleniye, Konditsionirovaniye. – 2021. – № 4 (232). – S. 46-48.

Authors of the publication

Radik N. Valiev – Kazan State Power Engineering University.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено

25.07.2025 г.

Отредактировано

01.08.2025 г.

Принято

15.08.2025 г.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 62-683

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-4-147-156

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДАТА-ЦЕНТРА

Юдин А.К.

ФГАОУ ВО «СПбПУ», г. Санкт-Петербург, Россия

yudin.a.k@mail.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Дата-центры (или ЦОД – центров обработки данных) – это специализированный объект, представляющий собой связанную систему ИТ-инфраструктуры, инженерной инфраструктуры, оборудование (серверного и сетевого) и части которых размещены в здании или помещении, подключенном к внешним сетям, как инженерным, так и телекоммуникационным. Из-за значительного тепловыделения данных систем возникла потребность в повышении эффективности систем охлаждения за счёт эффективной утилизации теплоты. **ЦЕЛЬ.** Расчет энергетического баланса типового дата-центра, проектируемого для эксплуатации в условиях центральной России. **МЕТОДЫ.** Разработанная энергетическая модель дата-центра представляет собой математическое описание всех энергетических процессов в здании, включая процессы теплопередачи, влияние вентиляции и кондиционирования, работу освещения, электроприборов и другого оборудования, работу инженерных систем. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Согласно результатам моделирования удельное потребление энергии составило 1353 кВт·ч/м², удельная годовая стоимость энергоресурсов – 8572,90 руб./м². Получены следующие ключевые результаты: потребляемая энергия модулями ЦОД – 38 399,53 МВт·ч/год; энергия, потребляемая ИТ оборудованием – 31 685,20 МВт·ч/год; PUE (представляет собой отношение общей потребляемой энергии ЦОД к энергии, непосредственно используемой ИТ-оборудованием) – 1,21. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Получены данные о годовом потреблении энергии, стоимости потребленных энергоресурсов и количестве CO₂, выбрасываемого в атмосферу при выработке энергетических ресурсов. Разработана месячная диаграмма потребления энергии по категориям (отопление, охлаждение, вентиляторы, утилизация тепла, насосы, внутреннее освещение, розеточное оборудование, серверы). В ходе дальнейших исследований планируется рассмотреть приоритетные схемы утилизации тепловой энергии дата-центра.

Ключевые слова: дата-центр; когенерация; утилизация тепловой энергии; энергетическое моделирование; централизованное теплоснабжение.

Для цитирования: Юдин А.К. Разработка энергетической модели дата-центра // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 147-156. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-147-156.

DEVELOPMENT OF AN ENERGY MODEL OF A DATA CENTER

Yudin A.K.

SPbPU, Saint Petersburg, Russia

yudin.a.k@mail.ru

Abstract: **RELEVANCE.** Data centers are a specialized facility that is an interconnected system of IT infrastructure, engineering infra-structure, equipment (server and network) and parts of which are located in a building or room connected to external networks, both engineering and telecommunications. Due to the significant heat generation of these systems, there is a need to increase the efficiency of cooling systems through efficient heat recovery. **THE PURPOSE.**

Calculation of the energy balance of a typical data center designed for operation in central Russia. METHODS. The developed energy model of a data center is a mathematical description of all energy processes in a building, including heat transfer processes, the effects of ventilation and air conditioning, the operation of lighting, electrical appliances and other equipment, and the operation of engineering systems. RESULTS. According to the simulation results, the specific energy consumption was 1,353 kWh/m², the specific annual cost of energy resources was 8,572.90 rubles/m². The following key results were obtained: energy consumed by data center modules – 38,399.53 MWh/year; energy consumed by IT equipment – 31,685.20 MWh/year; PUE (it represents the ratio of the total energy consumed by the data center to the energy directly used by the IT equipment) – 1.21. CONCLUSION. Data on annual energy consumption, the cost of consumed energy resources and the amount of CO₂ released into the atmosphere during the production of energy resources were obtained. A monthly energy consumption chart has been developed by category (heating, cooling, fans, heat recovery, pumps, interior lighting, outlet equipment, servers). In the course of further research, it is planned to consider priority schemes for the utilization of thermal energy of the data center.

Keywords: data center; cogeneration; heat energy utilization; energy modeling; centralized heat supply.

For citation: Yudin A.K. Development of an energy model of a data center. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (4): 147-156. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-147-156.

Введение (Introduction)

Согласно [1] суммарная мощность ЦОД в России превысила 500 МВт в 2021 г., по состоянию на 2024 г. эта величина равняется 800 МВт. Таким образом, ежегодный прирост потребляемой мощности в отрасли хранения данных составляет не менее 100 МВт/год. Известно, что практически вся электроэнергия, потребляемая основным оборудованием дата-центров, преобразуется во вторичную тепловую энергию. Внедрение дата-центров с отводом тепловой энергии внешним абонентам позволяет снизить потребление электрической энергии на охлаждение и утилизировать большую часть тепловой энергии (как правило, до 70%) от работы основного оборудования. Цель настоящего исследования заключается в расчете энергетического баланса типового дата-центра, проектируемого для эксплуатации в условиях центральной России.

Дата-центры играют важную роль в современном мире, так как они являются основой для работы большинства современных компаний, облачных сервисов и интернет-сервисов. По данным IDC (International Data Corporation – Международная корпорация информационных технологий), в 2021 году мировой рынок дата-центров оценивался в 152 миллиарда долларов США. Прогнозируется, что к 2025 году этот рынок вырастет до 236 миллиардов долларов [2].

Что касается России, то в настоящее время на ее территории действует множество дата-центров, как международных, так и российских компаний. Согласно отчету компании TAdviser (Российский интернет-ресурс и аналитическое агентство), к концу 2020 года в России насчитывалось более 370 дата-центров, которые находятся во всех регионах страны. Наибольшее количество дата-центров находится в Москве и Санкт-Петербурге, однако также имеются дата-центры в крупных городах, таких как Екатеринбург, Казань, Новосибирск и другие.

В настоящее время российский рынок дата-центров активно развивается. Согласно исследованию компании MarketsandMarkets, до 2025 года российский рынок дата-центров оценивается в 1,5 миллиарда долларов США и ожидается, что он будет расти с CAGR (Compound Annual Growth Rate – показатель совокупного среднегодового темпа роста) около 12% в период с 2020 по 2025 год.

Существует множество классификаций дата-центров, которые могут использоваться для определения их характеристик и применения в конкретных условиях. Основные классификации дата-центров:

Классификация по уровню доступности:

- Tier I (1-й уровень) – это дата-центр с минимальной доступностью, который не предоставляет гарантии непрерывности работы и имеет одну источник питания и охлаждения.

- Tier II (2-й уровень) – это дата-центр с повышенной доступностью, который имеет две независимые системы питания и охлаждения, что позволяет уменьшить вероятность простоя.

- Tier III (3-й уровень) – это дата-центр с высокой доступностью, который имеет двойные системы питания и охлаждения, которые работают независимо друг от друга и обеспечивают непрерывность работы в случае отказа одной из них.

- Tier IV (4-й уровень) – это дата-центр с максимальной доступностью, который имеет все преимущества Tier III, а также резервные системы источников питания и охлаждения, что обеспечивает наивысший уровень надежности.

Классификация по количеству содержащихся серверных стоек:

- Small data center (малый дата-центр) – это дата-центр, который может содержать от нескольких до нескольких десятков серверных стоек.

- Medium data center (средний дата-центр) – это дата-центр, который может содержать от нескольких десятков до нескольких сотен серверных стоек.

- Large data center (большой дата-центр) – это дата-центр, который может содержать более тысячи серверных стоек.

Классификация по характеру загрузки:

- Compute-intensive data center (Центр обработки данных с высокой вычислительной нагрузкой) – это дата-центр, который используется для выполнения тяжелых вычислительных задач, таких как научные расчеты и моделирование.

- Storage-intensive data center (Центр обработки данных с высокой нагрузкой на хранение данных) – это дата-центр, который используется для хранения и обработки больших объемов данных.

- Network-intensive data center (Центр обработки данных с высокой нагрузкой на сеть) – это дата-центр, который используется для обработки и передачи больших объемов медиа-данных.

Классификация по мощности электроснабжения на объект (согласно нормативной документации в Российской Федерации) [3]:

- Класс А – более 30 МВт.
- Класс В – от 15 до 30 МВт.
- Класс С – от 5 до 15 МВт.
- Класс D – от 0,5 до 5 МВт.
- Класс E менее 0,5 МВт.

Системы охлаждения серверных помещений дата-центров в принципиальном смысле разделяются на активные и пассивные. Активная схема охлаждения, представляет собой систему кондиционирования с использованием активных элементов, вентиляторов, где потоки воздуха протекают в специальных проходах, контролируемых перфорированными плитами. Удаление тепла в них происходит по схемам с открытыми проходами и с изолированными проходами. Данные решения являются самыми распространёнными решениями, однако при их использовании увеличивается потребление электроэнергии из-за необходимости в кондиционировании. Главным недостатком открытых проходов является смешивание холодных и горячих потоков воздуха, что приводит к увеличению температуры охлаждения. Недостатками же изолированных проходов являются более высокий уровень акустического шума и повышенное потребление электричества из-за холодильных компрессионных установок и охлаждающих вентиляторов. Пассивные системы представляют собой системы, где отсутствует активный элемент, а теплообмен происходит с помощью контакта охлаждаемых компонентов либо с теплоносителями, либо с рекуперативными теплообменными аппаратами.

Примером успешного использования утилизированного тепла от дата-центров являются Стокгольмские Дата Парки [4]. Данные объекты работают по чиллерной схеме охлаждения [5] и позволяют удовлетворить тепловые потребности около 2500 квартир. Как можно заметить из работы [6], многие дата-центры находятся в плотно застроенных зонах Лулео и Стокгольма. Положительный опыт применения тепла дата-центров для централизованного теплоснабжения также имеется в Финляндии. Одним из первых исследований потенциала использования тепла дата-центров стала работа [7]. В ней был проведён анализ дата центров воздушной системы охлаждения с применением чиллеров. Результаты моделирования показали, что рассматриваемый дата-центр может обеспечить ежегодное отопление помещений и нагрев горячей воды для помещений общей площадью около 30 тыс. м². Согласно [8, 9], страны Северной Европы хорошо подходят для дата-центров из-за простоты внедрения фрикулинговых систем в силу более низких наружных температур и возможностей использования воды от моря и озер.

В России существует несколько решений для систем охлаждения дата-центров. Одним из таких решений является использование метода фрикулинга, который использует воздух из окружающей среды для охлаждения серверного оборудования [10-12]. Данное решение может быть достаточно эффективно в холодный период года [13]. Другим решением для систем охлаждения может быть применение жидких теплоносителей, которые используются, например, в работе чиллерных систем. Также применяется метод иммерсионного охлаждения, являющийся сравнительно инновационным. Такой метод позволяет существенно снизить затраты на энергию и обслуживание, благодаря использованию жидкости с высокими теплофизическими характеристиками. Однако, такие системы требуют затрат на устройства подачи и отвода теплоносителя, а также на системы контроля обработки охлаждающей жидкости и системы безопасности [14, 15]. Стоит отметить, что не все типы серверного оборудования способны работать в системе иммерсионного охлаждения, некоторые из компонентов чувствительны к воздействию жидкостей, что влечет за собой необходимость установки дополнительной защиты.

Материалы и методы (Materials and methods)

Энергомоделирование – это процесс создания цифровой модели здания, которая позволяет анализировать его энергопотребление и внутренний микроклимат. Энергетическая модель представляет собой математическое описание всех энергетических процессов в здании, включая процессы теплопередачи, влияние вентиляции и кондиционирования, работу освещения, электроприборов и другого оборудования, работу инженерных систем [16]. Такая модель может использоваться для многих целей, включая оценку текущего энергопотребления, прогнозирование будущих затрат на энергию, сравнение различных проектных решений и их влияние на энергоэффективность, а также для оценки выбросов CO_2 и разработке программ углеродной нейтральности [17].

В данной работе была создана энергетическая модель для оценки энергоэффективности проектных решений здания. Это было достигнуто путем моделирования работы здания и его инженерных систем на протяжении года, что позволило подробно проанализировать общее расчётное энергопотребление. Полученные результаты также могут служить отправной точкой для последующих исследований и разработки мер по оптимизации энергопотребления реальным зданием.

Построение энергетической модели – поэтапный и комплексный процесс. Построение энергетической модели состоит из следующих шагов (рис. 1):

1. Назначение местоположения, ориентации по сторонам света и использование климатических данных для учета внешних условий среды.
2. Построение геометрии модели на основе архитектурных чертежей, включая форму и размеры здания, его этажность и архитектурные особенности.
3. Назначение теплофизических свойств материалов и конструкций здания: теплопроводность, удельную теплоемкость и другие характеристики для точного моделирования процессов теплопередачи.
4. Определение функционала помещений, режимов их работы, а также поддерживаемые параметры микроклимата.
5. Назначение основных потребителей электроэнергии: система электрического освещения, розеточное оборудование, а также специализированное оборудование, такое как серверы и другие технические устройства.
6. Создание математической модели работы инженерных систем здания: моделирование работы систем отопления, вентиляции, кондиционирования, холодоснабжения и теплоснабжения.
7. Расчет годового цикла работы инженерных систем, внутренних параметров микроклимата и выбросов CO_2 .

Для энергетического моделирования объекта использовался программный комплекс, расчетный модуль которого – программа для динамического моделирования, основанная на прямом численном моделировании процессов теплопередачи, происходящих внутри и снаружи здания. Эта программа служит средой для детальной оценки здания и работы его систем с точки зрения потребления энергии и комфорта. В рамках расчётов процессы передачи теплоты посредством теплопроводности, конвекции и излучения для каждого из элементов здания моделируются индивидуально и в связке с данными о теплопоступлениях в помещения, воздухообмене и математической модели работы оборудования систем отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВиК). Моделирование выполняется на основе детальных погодных данных и может покрывать любой период времени от одного дня до одного

года. Тепловые процессы здания моделируются на интервалах времени вплоть до одной минуты.



Рис. 1. Основные этапы создания энергетической модели Fig. 1. The main stages of creating an energy model

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

Климатическая зона: Зона умеренно-континентального климата. Основными признаками этого вида умеренного климата является жаркое лето и морозная зима.

Наружные климатические условия:

- Для системы отопления: Расчётная температура наружного воздуха в холодный период -31°C .

- Для системы вентиляции и кондиционирования: Расчётная температура наружного воздуха в холодный период -37°C . Расчётная температура наружного воздуха в тёплый период $+40^{\circ}\text{C}$.

Приведённые климатические параметры используются для инженерного расчёта потребности помещений в тепловой и холодильной нагрузке, а также для расчёта нагрузок для смоделированных систем ОВиК методом теплового баланса. Метод теплового баланса представляет собой расчет нестационарного теплового баланса помещения с учетом воздействий солнечной радиации и температуры наружного воздуха, а также внутренних технологических и бытовых теплопоступлений для определения нагрузки на системы ОВиК.

Этот метод является стандартным подходом к расчету тепловых нагрузок здания и широко используется в инженерной практике для проектирования систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Он позволяет учитывать множество факторов, влияющих на тепловые условия внутри здания, и обеспечивает основу для оптимизации проектирования систем комфорта и энергоэффективности.

Построение архитектурной модели – это процесс создания цифрового представления здания с учетом его геометрии, расположения, ориентации и конструктивных особенностей. Архитектурная модель включает в себя информацию о форме и размерах здания, расположении окон и дверей, типах и характеристиках строительных материалов, а также другие архитектурные детали (рис. 2).

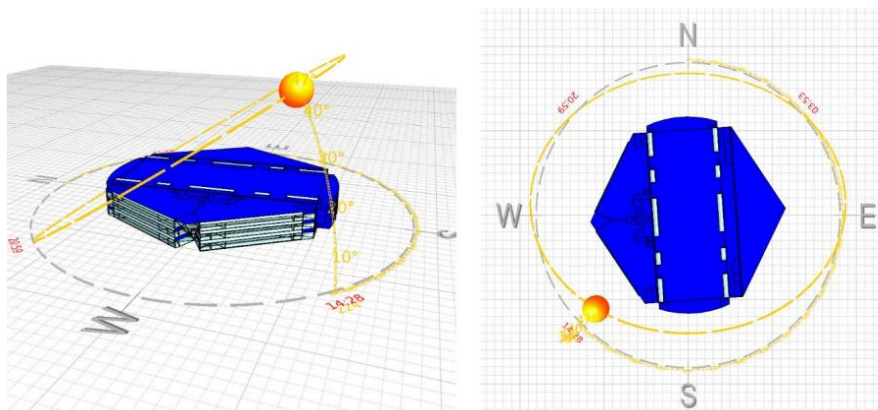


Рис. 2. Архитектурная модель здания

Fig. 2. Architectural model of the building

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

Она является основой для последующего создания энергетической модели, так как она определяет физические параметры здания, необходимые для расчета его энергетических характеристик. Архитектурная модель строится на основе чертежей разделов Архитектурные решения и Конструктивные решения проектной документации.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Ниже представлены результаты энергетического моделирования всего здания технического центра. В табл. 1 приведены данные о годовом потреблении энергии, стоимости потребленных энергоресурсов и количестве CO₂, выбрасываемого в атмосферу при выработке энергетических ресурсов.

Таблица 1

Table 1

Абсолютные показатели энергопотребления

Absolute energy consumption figures

Показатель	Годовое потребление энергии, кВт·ч	Годовая стоимость энергоресурсов, руб.	Годовые выбросы CO ₂ , кг
Величина	39 775 715,45	251 985 829,14	13 777 530,00

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

На рисунке 3 представлено общее годовое потребление энергии с разбиением на тепловую энергию и электрическую энергию, на рисунке 4 – годовая стоимость энергоресурсов.

Согласно результатам моделирования удельное потребление энергии составило 1353 кВт·ч/м², удельная годовая стоимость энергоресурсов – 8572,90 руб./м². На рисунке 5 представлено удельное энергопотребление по категориям оборудования. На рисунке 6 представлена помесечная диаграмма потребление энергии по категориям.



Рис. 3. Годовое энергопотребление по видам энергии, МВт·ч

Fig. 3. Annual energy consumption by energy types, MWh

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



Рис. 4. Стоимость энергоресурсов, млн. руб. Fig. 4. Cost of energy resources, million rubles
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

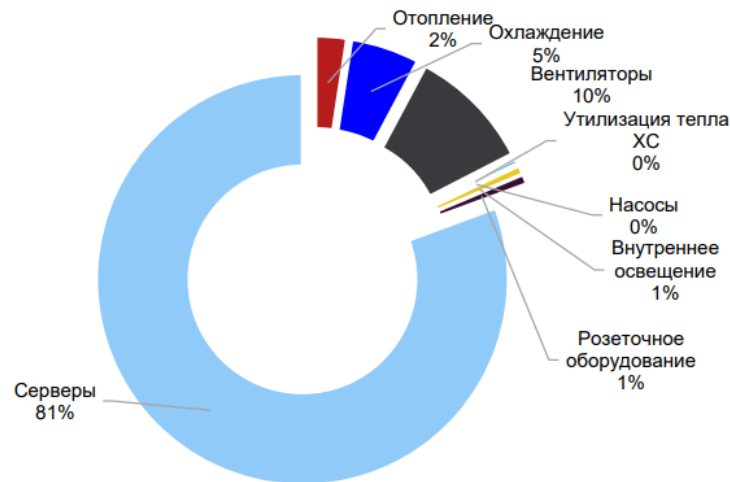


Рис. 5. Удельное энергопотребление по категориям оборудования Fig. 5. Specific energy consumption by equipment categories
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

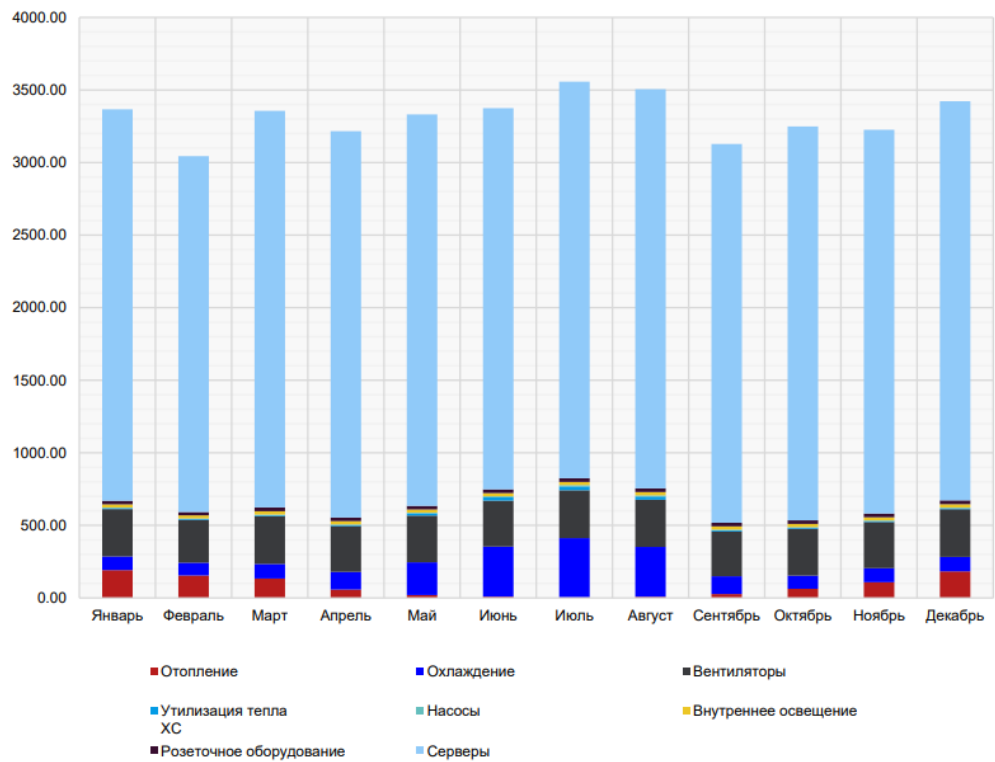


Рис. 6. Годовое месячное потребление энергии с разбиением по категориям, МВт·ч Fig. 6. Annual monthly energy consumption by category, MWh
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Power Usage Effectiveness (PUE) является ключевым показателем энергоэффективности центров обработки данных (ЦОД). Он представляет собой отношение общей потребляемой энергии ЦОДа к энергии, непосредственно используемой ИТ-оборудованием. При этом общая потребляемая энергия включает в себя все источники энергопотребления в ЦОДе, такие как системы охлаждения, источники бесперебойного питания (ИБП), освещение и другие вспомогательные системы. Энергия, потребляемая ИТ-оборудованием, охватывает только энергию, необходимую для работы серверов, систем хранения данных и сетевого оборудования.

PUE предоставляет важную информацию для анализа и оптимизации энергетической эффективности ЦОДа. Идеальное значение PUE равно 1, что указывает на то, что вся потребляемая энергия используется исключительно ИТ-оборудованием без дополнительных потерь на вспомогательные системы. В реальности, PUE обычно превышает 1, и снижение этого показателя свидетельствует о повышении эффективности использования энергии. Общая потребляемая энергия модулями ЦОД складывается из энергопотребления: чиллеров, насосов системы холодоснабжения (ХС), конденсаторов системы ХС, освещения, розеточного оборудования, вентиляторов.

Таким образом, показатели годового потребления энергии для модулей ЦОД составляет:

- Потребляемая энергия модулями ЦОД – 38 399,53 МВт·ч/год;
- Энергия, потребляемая ИТ оборудованием – 31 685,20 МВт·ч/год;
- PUE – 1,21.

Заключение (Conclusions)

Выбор решения для охлаждения дата-центров в России зависит от многих факторов, таких как климатические условия, доступность ресурсов, требования к надежности и эффективности, а также бюджетные ограничения. Использование теплоты дата-центров требует серьезного подхода и профильных компетенций, но может быть эффективным комплексным решением для повышения эффективности систем централизованного теплоснабжения.

Одним из перспективных решений является размещение дата-центров на территориях действующих энергетических объектов:

- Земельные участки оформлены, на освобождаемых площадях предусмотрено развитие под новое технологическое строительство.
- Доступны качественные и надежно поставляемые энергетические ресурсы, при этом при наличии собственной генерации стоимость электрической энергии может быть ниже, чем из сети.
- Площадки обеспечены транспортным сообщением, комплексом инженерно-технических средств охраны и ресурсами жизнеобеспечения для эксплуатации ЦОД.
- Объекты размещаются в развитых районах, т.е. там, где есть жилая среда и крупные промышленные потребители.

Литература

1. IKS Consulting. Аналитический отчет «Российский рынок коммерческих дата-центров 2023» [Электронный ресурс]: Рынок коммерческих ЦОД в России 2023 – Режим доступа: <https://survey.iksconsulting.ru/page30265406.html>
2. International Data Corporation. Режим доступа: <https://www.idc.com/>.
3. ГОСТ Р 70139-2022 Центры обработки данных. Инженерная инфраструктура. Классификация.
4. Stockholm Data Parks [Электронный ресурс]: Stockholm Data Parks – Режим доступа: <https://stockholmdataparks.com/>.
5. Arianna Tofani. A case study on the integration of excess heat from Data Centres in the Stockholm district heating system // TRITA: TRITA-ITM-EX 2022:469, Stockholm, Sweden 2022. p. 56.
6. Cristina Ramos Caceres, Marcus Sandberg, Adolfo Sotoca. Planning data center locations in Swedish municipalities. A comparative case study of Luleå and Stockholm // Cities 150, 2024. p. 22.
7. Tao Lu, Xiaoshu Lü, Matias Remes, Martti Viljanen. Investigation of air management and energy performance in a data center in Finland: Case study // Energy and Buildings 43, 2011. p. 3360–3372.
8. Mikko Wahlroos, Matti Pärssinen, Samuli Rinne, Sanna Syri, Jukka Manner. Future views on waste heat utilization – Case of data centers in Northern Europe // Renewable and Sustainable Energy Reviews 82, 2018. p. 1749–1764.
9. Mikko Wahlroos, Matti Pärssinen, Jukka Manner, Sanna Syri. Utilizing data center waste heat in district heating – Impacts on energy efficiency and prospects for low-temperature district heating networks // Energy 140, 2017. p. 1228–1238.

10. Рассмуссен Н. Расчет технических требований для общего охлаждения в центрах обработки данных / Н. Рассмуссен // Информационная статья American Power Conversion. – 2003. – № 25. – 9 с.
11. Chayan Nadjahi, Hasna Louahlia, Stéphane Lemasson A review of thermal management and innovative cooling strategies for data center // NORMANDIE UNIV, UNICAEN, LUSAC, 2018. p. 14-28.
12. Ahmed A. Alkurush, Mohamed S. Salem, O. Abdelrehim, A.A. Hegazi. Data centers cooling: A critical review of techniques, challenges, and energy saving solutions // International Journal of Refrigeration 160, 2024. p. 246-262.
13. Suhas V. Patankar. Airflow and cooling in a data center // Journal of Heat Transfer, 2010. p. 17.
14. B. Fakhim, M. Behnia, S.W. Armfield, N. Srinarayana. Cooling solutions in an operational data centre: A case study // Applied Thermal Engineering 31, 2011. p. 2279-2291.
15. Hongjie Lu, Zhongbin Zhang, Liu Yang. A review on airflow distribution and management in data center // Energy & Buildings 179, 2018. p. 265-277.
16. Ю.И. Солуянов, А. И. Федотов, А. Р. Ахметшин // Расчет поправочного коэффициента к нормативным значениям удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов г. Москвы и Московской области // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 142-153. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-4-142-153. – EDN CAFEMG.
17. М.С. Иваницкий // Технологические нормативы и показатели выбросов ТЭСИ котельных // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 3-15. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-3-3-15. – EDN GWNTMS.

Авторы публикации

Юдин Александр Константинович – аспирант ФГАОУ ВО «СПбПУ», Высшая школа атомной и тепловой энергетики, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: yudin.a.k@mail.ru

References

1. IKS Consulting. Analytical report "Russian market of commercial data centers 2023" [Electronic resource]: The market of commercial data centers in Russia 2023 – Access mode: <https://survey.iksconsulting.ru/page30265406.html>
2. International Data Corporation. Режим доступа: <https://www.idc.com/>.
3. GOST R 70139-2022 Data processing centers. Engineering infrastructure. Classification.
4. Stockholm Data Parks [Electronic resource]: Stockholm Data Parks – Access mode: <https://stockholmdataparks.com/>.
5. Arianna Tofani. A case study on the integration of excess heat from Data Centres in the Stockholm district heating system // TRITA: TRITA-ITM-EX 2022:469, Stockholm, Sweden 2022. p. 56.
6. Cristina Ramos Caceres, Marcus Sandberg, Adolfo Sotoca. Planning data center locations in Swedish municipalities. A comparative case study of Luleå and Stockholm // Cities 150, 2024. p. 22.
7. Tao Lu, Xiaoshu Lü, Matias Remes, Martti Viljanen. Investigation of air management and energy performance in a data center in Finland: Case study // Energy and Buildings 43, 2011. p. 3360–3372.
8. Mikko Wahlroos, Matti Pärssinen, Samuli Rinne, Sanna Syri, Jukka Manner. Future views on waste heat utilization – Case of data centers in Northern Europe // Renewable and Sustainable Energy Reviews 82, 2018. p. 1749–1764.
9. Mikko Wahlroos, Matti Pärssinen, Jukka Manner, Sanna Syri. Utilizing data center waste heat in district heating – Impacts on energy efficiency and prospects for low-temperature district heating networks // Energy 140, 2017. p. 1228–1238.
10. Rasmussen N. Calculation of technical requirements for general cooling in data centers / N. Rasmussen // American Power Conversion Information Technology. – 2003. – № 25. – 9 С.
11. Chayan Nadjahi, Hasna Louahlia, Stéphane Lemasson A review of thermal management and innovative cooling strategies for data center // NORMANDIE UNIV, UNICAEN, LUSAC, 2018. p. 14-28.
12. Ahmed A. Alkurush, Mohamed S. Salem, O. Abdelrehim, A.A. Hegazi. Data centers cooling: A critical review of techniques, challenges, and energy saving solutions // International Journal of Refrigeration 160, 2024. p. 246-262.
13. Suhas V. Patankar. Airflow and cooling in a data center // Journal of Heat Transfer, 2010. p. 17.
14. B. Fakhim, M. Behnia, S.W. Armfield, N. Srinarayana. Cooling solutions in an operational data centre: A case study // Applied Thermal Engineering 31, 2011. p. 2279-2291.
15. Hongjie Lu, Zhongbin Zhang, Liu Yang. A review on airflow distribution and management in data center // Energy & Buildings 179, 2018. p. 265-277.
16. Yu.I. Soluyanov, A. I. Fedotov, A. R. Akhmetshin // Calculation of the correction factor to the normative values of specific electrical loads of apartment buildings in Moscow and the Moscow region // Publications of higher educational institutions. Energy problems. – 2022. – Vol. 24, No. 4. – pp. 142-153. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-4-142-153.

17. M.S. Ivanitsky // Technological standards and emission indicators of thermal power plants and boiler houses // News of higher educational institutions. Problematic issues. – 2024. – VOL. 26, No. 3. – pp. 3-15. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-3-3-15.

Authors of the publication

Alexander K. Yudin – SPbPU, Higher School of Atomic and Thermal Energy, Saint Petersburg, Russia. E-mail: yudin.a.k@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **03.06.2025 г.**

Отредактировано **19.06.2025 г.**

Принято **03.07.2025 г.**

Сдано в набор 15.08.2025 г.
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 500 экз.

Подписано к печати 00.00.2025 г.
Усл. печ. л. 18,3
Заказ № 5320
Дата выхода в свет г.00.00.2025 г.

Формат 60*90/8
Уч.изд. л. 11,62.
Цена свободная

