



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) 2 / 2025

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

Scientific & Technical Journal

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



УДК 620.179.18

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-2-3-19

КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

Брякин И.В.¹, Бочкарев И.В.², Храмшин В.Р.³

¹Институт машиноведения, автоматизации и геомеханики Национальной Академии Наук
Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан

²Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек,
Кыргызстан

³Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия
bivas2006@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в необходимости обеспечения высокой надежности и безаварийности работы электрических кабелей для линий передачи электроэнергии и информационных высокочастотных сигналов путем неразрушающего контроля их параметров. ЦЕЛЬ. Предложить новый способ комплексной диагностики электрических кабелей, позволяющий повысить эффективность неразрушающего контроля параметров электрических кабелей за счет повышения точности проверки и увеличению количества одновременно контролируемых параметров. МЕТОДЫ. При теоретическом обосновании нового способа применялись базовые методы теоретической электротехники, а при разработке схемотехнических решений использовались системы цифровой обработки комплексных параметров информационных сигналов. РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработан и теоретически обоснован кондуктометрический способ неразрушающего контроля параметров основных элементов кабеля. Разработана структурная блок-схема реализации данного способа. Показано, что предложенное техническое решение позволяет регистрировать электрический сигнал, содержащий информацию о текущих электрических параметрах контролируемого участка электрического кабеля, по которым можно оценить техническое состояние его токопроводящих элементов и изоляции. На базе этого способа разработан способ оперативного допускового контроля параметров электрических кабелей с использованием в качестве базового критерия параметры эталонного отрезка конечной длины контролируемого кабеля без дефектов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование в качестве электродов разъемных металлических цилиндров позволяет использовать данные способы контроля как при изготовлении кабеля, так и на действующих кабельных линиях без нарушения их целостности в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: кабель; металлические токоведущие жилы; изоляция; разъемный цилиндрический электрод; электрическая емкость; кондуктометрическая ячейка; дрессель; квадратная демодуляция.

Для цитирования: Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмшин В.Р. Кондуктометрический метод неразрушающего контроля параметров электрических кабелей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 3-19. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-3-19.

CONDUCTOMETRIC METHOD OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF ELECTRIC CABLE PARAMETERS

Bryakin I.V.¹, Bochkarev I.V.², Khramshin V.R.³

¹Institute of Mechanical Engineering, Automation and Geomechanics of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan

²Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan

³Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russia
bivas2006@yandex.ru

Abstract: THE RELEVANCE of the study lies in the need to ensure high reliability and trouble-free operation of electric cables for power transmission lines and high-frequency information signals by non-destructive testing of their parameters. OBJECTIVE. To propose a new method for comprehensive diagnostics of electric cables, which allows increasing the efficiency of non-destructive testing of electric cable parameters by increasing the accuracy of testing and increasing the number of simultaneously monitored parameters. METHODS. Basic methods of theoretical electrical engineering were used for the theoretical justification of the new method, and digital systems for processing complex parameters of information signals were used in the development of circuit solutions. RESULTS. A conductometric method for non-destructive testing of parameters of the main cable elements has been developed and theoretically substantiated. For testing, two detachable cylindrical electrodes are applied to the examined section of a round metal core with dielectric insulation, which together with the examined part of the wire form a conductometric cell. It is shown that the electrical capacitance of this cell characterizes the electrical parameters of the wire, which are obtained from the measured information signal using the quadrature demodulation method. A structural block diagram for implementing this method has been developed. It is shown that the proposed technical solution allows recording an electric signal containing information on the current electric parameters of the controlled section of the electric cable, by which it is possible to assess the technical condition of its conductive elements and insulation. Based on this method, a method for operational tolerance control of the parameters of electric cables has been developed using the parameters of the reference section of the final length of the controlled cable without defects as a basic criterion. CONCLUSION. The use of detachable metal cylinders as electrodes allows using these control methods both in cable manufacturing and on existing cable lines without violating their integrity in real time.

Keywords: cable; metal current-carrying conductors; insulation; detachable cylindrical electrode; electrical capacitance; conductometric cell; choke; quadrature demodulation.

For citation: Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R. Conductometric method of non-destructive testing of electric cable parameters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (2): 3-19. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-3-19.

Введение (Introduction)

В настоящее время бесперебойная работа систем электроснабжения и электрооборудования всех отраслей хозяйства, от промышленных предприятий и транспорта до сельского и коммунального хозяйств, напрямую зависит от надежной работы силовых электрических кабелей [1, 2]. Наряду с транспортировкой электроэнергии, кабели применяются и для передач информационных высокочастотных сигналов [3, 4]. Таким образом, качество кабельной продукции однозначно определяет не только надежность электроснабжения, но и систем сбора данных, удаленного контроля и распределенного управления. Поэтому кабельная промышленность в настоящее время находится в стадии интенсивного роста [5].

Собственные параметры кабелей могут меняться на всех его жизненных этапах – как в процессе изготовления на заводе, так и во время хранения, транспортировки, монтажа и эксплуатации, при различных диагностических процедурах, ремонте и т.д. Так, в процессе эксплуатации на кабель действуют не только электрические нагрузки, но и внешние климатические факторы, а также различные техногенные воздействия, например, строительные работы в зоне прохождения кабельной линии (КЛ). Кроме того, имеет место естественное старение кабеля, а также случайные ошибочные воздействия на него [6-8]. Поэтому, для уменьшения риска аварийного выхода из строя кабеля необходимо применять

системы контроля его состояния. Конечно, это требует определенных материальных затрат, однако аварийные отключения линий электропередач приводят к принципиально большим расходам, а в ряде случаев и к катастрофическим последствиям (например, на военных объектах, в больницах и т.п.).

Основное функциональное назначение электрического кабеля выполняют его металлические токоведущие жилы, по которым непосредственно протекает электрический ток и информационные сигналы, поэтому они должны гарантированно обладать заданными параметрами. Для того, чтобы токопроводящие жилы успешно выполняли свои функции, их необходимо защищать от растекания тока и информационных сигналов в окружающую среду, а также изолировать друг от друга. Кроме того, необходимо гарантировать безопасность эксплуатации кабеля путем защиты как от соприкосновения с его токоведущими элементами, так и от воздействия на них окружающей среды. Все эти функции выполняет изоляционная диэлектрическая оболочка каждой токоведущей жилы и кабеля в целом. Таким образом, токоведущие жилы обеспечивают целевое назначение и качественные характеристики кабеля, а его изоляция обеспечивает надежность и безопасность его работы. Поэтому очевидно, что при диагностике кабеля необходим контроль обоих указанных параметров кабеля.

Цель исследования заключается в повышении эффективности неразрушающего контроля параметров электрических кабелей за счет повышении точности проверки и увеличении количества одновременно контролируемых параметров.

Научная значимость исследования состоит в разработке и теоретическом обосновании нового способа комплексной диагностики электрических кабелей, позволяющий одновременно осуществлять диагностику как их электропроводящих элементов, так и изоляции, а также в создании на его базе способа оперативного допускового контроля параметров электрических кабелей с использованием в качестве критерия параметров эталонного отрезка контролируемого кабеля без дефектов.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения разработанных способов и устройств их аппаратной реализации для контроля в реальном масштабе времени параметров кабеля как при его изготовлении, так и в условиях эксплуатации на действующих кабельных линиях без нарушения их целостности, и возможность создания простых систем отбраковки кабеля, имеющего параметры, выходящие за допустимые пределы.

По сравнению с известными, разработанные способы контроля обеспечивают не только расширение эксплуатационных возможностей за счет комплексного контроля как электропроводящих, так и электроизоляционных свойств кабельной продукции, но и расширение области их применения. Последнее объясняется тем, что эти способы можно использован не только для диагностики электрических кабелей и проводов, но и для других металлических изделий с малым поперечным сечением круглой формы, имеющих внешнее покрытие или оболочку из изоляционных материалов, например, металлополимерных тросов, проволоки, стержней и т.п.

Литературный обзор (Literature Review)

Общие вопросы контроля качества кабельных изделий

Очевидно, что контроль качества кабельных изделий наиболее целесообразно проводить неразрушающими методами в реальном масштабе времени. Такой контроль необходим как на стадии изготовления кабельной продукции, так и в процессе ее эксплуатации.

В настоящее время существует множество методов и средств неразрушающего контроля кабелей, каждый из которых направлен на проверку параметров одного определенного элемента кабеля. Они достаточно подробно описаны в соответствующей технической литературе, например, в [9-17]. Так, в [9] описаны методы как разрушающего, так и неразрушающего контроля электрических свойств кабелей и физико-химических характеристик их изоляции. Рассмотрены физические методы испытаний и диагностики конструктивных элементов кабелей и технологических процессов их изготовления, а также описаны методы обработки результатов испытаний. Методы контроля дефектов токопроводящих жил кабеля, выполненных как из сталесодержащих магнитных материалов, так и из немагнитных материалов, представлены в [10]. Описаны физические принципы работы устройств контроля, а также возможная аппаратная реализация этих устройств. Часть из перечисленных работ посвящена диагностике неисправности кабеля непосредственно во время его работы в полевых условиях. Практически в этих условиях доступны различные методы контроля: тепловой контроль, испытания на частичный разряд, диэлектрические потери, испытания на удлинение при разрыве. Например, в [14]

рассмотрена диагностика изоляции силовых кабелей и кабельных муфт под рабочим напряжением путем непрерывного контроля ее температуры. Предложена методика выявления наличия коротких замыканий, в том числе кратковременных, на конкретных участках кабельной линии. В [15, 16] рассмотрена диагностика кабельных линий на основе поиска и локализации места возникновения дефектов в изоляции на основании измерения и анализа частичных разрядов. В [17] рассматривается использование рефлектометрии во временной и частотной областях для диагностики и мониторинга кабелей в реальных условиях. Показано, что такой тип рефлектометрии является более точный, чем обычная рефлектометрия за счет использования локализованных во временной и частотной областях сигналов, устойчивых к шуму.

Инновационные способы и устройства диагностики электропроводящих элементов кабеля описаны в [18, 19]. В этих работах предложены способы дефектоскопии, основанные на воздействии переменным электрическим полем на указанные элементы и возбуждении в них тем самым волнового процесса в виде поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов на резонансной частоте этой поляризации. Этот процесс регистрируют индукционным датчиком, формирующим выходной информационный сигнал в виде ЭДС, амплитуда и фаза которой позволяют получить информацию о месте и виде дефекта электропроводящих жил, а также о физико-химических свойствах их материалов.

При этом следует отметить, что наиболее уязвимой частью кабеля, которая наиболее часто приводит к возникновению аварийных ситуаций, является изоляция кабелей и проводов. Поэтому именно контролю качества изоляции посвящено большая часть работ по диагностике состояния кабеля [20-22]. В данных статьях показана необходимость диагностики кабеля в различных областях применения, представлен обзор последних достижений в области неразрушающего контроля изоляции кабелей, описаны основные способы и современное оборудование, необходимые для этого, показаны перспективы развития диагностических методов.

Анализ показал, что на практике в основном используют два электрических метода технологического контроля качества изоляции кабельных изделий: электроискровой и электроемкостный.

Электроискровой метод контроля осуществляется путем приложения высокого испытательного напряжения к поверхности изоляции при заземленной токопроводящей жиле. Для реализации этого метода применяется искровые дефектоскопы, которые при наличии дефекта фиксируют электрический пробой изоляции в этом месте [23]. Однако такой процесс контроля изоляция сопровождается увеличением уже существующего дефекта и снижением тем самым качества кабеля, что является существенным недостатком данного метода контроля.

При электроемкостном методе осуществляют контроль емкости кабельного изделия, которая является одной из основных нормируемых величин, определяющих их качество. Это объясняется тем, что емкость провода зависит как от его геометрических размеров, так и от электрических свойств изоляции [24], поэтому контролируя изменение емкости можно определить отклонения как электрических, так и геометрических параметров кабеля от нормируемых величин [25-27]. В [25] описана конструкция электроемкостного измерительного преобразователя для технологического контроля погонной емкости электрического кабеля в процессе производства. Показана процедура выбора оптимальных конструктивных параметров основных элементов преобразователя. В [26] показано, что поскольку диэлектрическая проницаемость изоляции кабеля будет соответствующим образом изменяться при возникновении дефекта в изоляции кабеля, то применение электрической емкостной томографии позволит отображать пространственное распределение диэлектрической проницаемости изоляции. Описан датчик с восьмиэлектродной матрицей, при этом емкость кабеля определяется с помощью импедансметра. В [27] описан процесс обнаружения наличия дефектов внутри кабельных аксессуаров путем выявления изменений емкости кабеля. Для этого сравнивались емкости кабеля без дефектов и кабеля, содержащего дефект. Показано также, что напряженность электрического поля внутри дефекта может запустить процесс частичного разряда.

Таким образом, для всестороннего контроля необходимо использовать сразу нескольких устройств, что делает общую систему контроля громоздкой, дорогой и неудобной в эксплуатации. Поэтому, несмотря на большое количество работ, проводимых во всем мире по созданию устройств диагностики и контроля параметров электрических кабелей, актуальными является исследования по разработке универсальных неразрушающих способов и устройств мониторинга состояния кабеля, позволяющих комплексно контролировать указанные параметры.

Разработка нового способа комплексной диагностики электрических кабелей

Известно, что электрическая емкость одинарного двухэлектродного цилиндрического конденсатора (ЦК) с заполненным воздухом межэлектродным пространством, электроды которого представлены в виде двух коаксиальных металлических цилиндров с осевой длиной l (м), радиусами внутреннего и внешнего электрода соответственно r_i и r_{i+1} (м) определяется в соответствии с выражением вида [28, 29]:

$$C = \varepsilon_0 \times \varepsilon_1 \times \frac{2\pi \times l}{\ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)} \quad (1)$$

В случае заполнения этого межэлектродного пространства бинарной средой, состоящей уже из воздуха и диэлектрического материала, двухэлектродный цилиндрический конденсатор будет представлять собой два последовательно соединенных двухэлектродных ЦК C_1 и C_2 соответственно с воздухом и диэлектрическим материалом (рис. 1).

Тогда, для двухэлектродного ЦК, заполненного бинарной средой, электрическая емкость будет определяться следующей зависимостью:

$$C^{-1} = C_1^{-1} + C_2^{-1}, \quad (2)$$

где $C_1 = \varepsilon_0 \times \varepsilon_1 \times \frac{2\pi \times l}{\ln(r_1 / r_0)}$; $C_2 = \varepsilon_0 \times \varepsilon_2 \times \frac{2\pi \times l}{\ln(r_2 / r_1)}$; r_0 и r_1 – радиусы внутреннего и внешнего электродов конденсатора C_1 заполненного воздухом; r_2 – радиус внешнего электрода конденсатора C_2 , заполненного диэлектрическим материалом; ε_1 – диэлектрическая постоянная воздуха; ε_2 – диэлектрическая постоянная диэлектрического материала (ДМ).

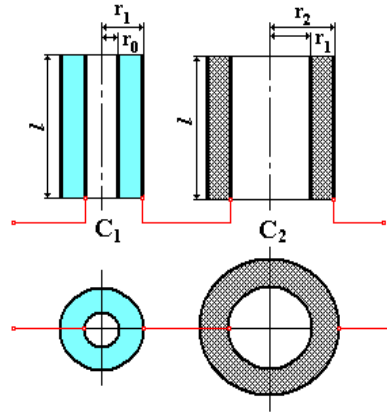


Рис. 1. Схема замещения цилиндрического конденсатора с бинарным заполнением

Fig. 1. Equivalent circuit of a cylindrical capacitor with binary filling

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

Определим величину, обратную величине суммарной электрической емкости:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{2\pi \times \varepsilon_0 \times l} \times \left[\ln(r_1 / r_0) + \frac{\ln(r_2 / r_1)}{\varepsilon_2} \right] = \frac{1}{2\pi \times \varepsilon_0 \times l} \times \left[\ln r_1 - \ln r_0 + \frac{\ln r_2 - \ln r_1}{\varepsilon_2} \right]. \quad (3)$$

Примем, что $d_1 = (r_1 - r_0)$ – толщина слоя воздуха, условно равномерно распределенного по поверхности электрода; $d_2 = (r_2 - r_1)$ – толщина слоя ДМ, условно равномерно распределенного по поверхности электрода; $D = (d_1 + d_2)$ – средняя величина зазора между внешним и внутренним электродами ЦК.

С учетом того, что $0 < r_{i+1} / r_i \leq 2$ выражение (3) можно привести к виду:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{2\pi \times \varepsilon_0 \times l} \times \left[D - \frac{\varepsilon_2 - 1}{\varepsilon_2} \times d_2 \right]. \quad (4)$$

В соответствии с (4) определим величину суммарной электрической емкости:

$$C = \frac{2\pi \times \varepsilon_0 \times l}{D - \frac{\varepsilon_2 - 1}{\varepsilon_2} \times d_2} \quad (5)$$

Известно, что объемное электрическое сопротивление для ДМ, находящегося в межэлектродном пространстве ЦК с коаксиально расположенными электродами, определяется выражением:

$$G_{\text{ДМ}} = G_2 = g_v \times \frac{\ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}{2\pi l} = g_2 \times \frac{d}{2\pi l} \quad (6)$$

где d – толщина слоя ДМ, находящегося в межэлектродном пространстве ЦК; l – осевая длина ЦК; $g_v = g_2$ – удельное объемное электрическое сопротивление ДМ.

С учетом (6) выражение (5) можем переписать в следующем виде:

$$C = \frac{2\pi \times \epsilon_0 \times l}{D - \frac{\epsilon_2 - 1}{\epsilon_2} \times \frac{2\pi \times l \times G_2}{g_2}}. \quad (7)$$

Для ЦК определим величину импеданса:

$$\dot{Z}_C = -j \times \frac{1}{\omega \times C} = -j \times \frac{1}{2\pi \times \omega \times \epsilon_0 \times l} \times \left(D - \frac{\epsilon_2 - 1}{\epsilon_2} \times \frac{2\pi \times l \times G_2}{g_2} \right). \quad (8)$$

С целью утилитарного применения (8) предлагается в качестве внутреннего электрода рассматриваемого ЦК использовать часть поверхности длинномерного электрического провода (ДЭП) в виде металлической жилы круглого сечения с диэлектрической изоляцией, расположенного коаксиально внутри внешнего электрода этого ЦК. При этом диэлектрическая изоляция ДЭП является, как и воздух, одним из элементов бинарной среды, заполняющей ЦК.

Исследуем функциональные возможности варианта схемотехнического решения, при котором внутри двух соосно расположенных и разнесенных на определенное расстояние идентичных металлических разрезных цилиндрических электродов 2 и 3 коаксиально помещен ДЭП в виде металлической жилы круглого сечения 1 с диэлектрической изоляцией 1' (рис. 2), а L , 4 и 5 – соответственно индуктивность, магнитопровод и электрическая обмотка дросселя; $\dot{U}_r$ – питающее синусоидальное электрическое напряжения; $\dot{U}_{\text{изм}}$ – информационный сигнал, снимаемый с обмотки 5 дросселя.

Конструктивно электроды 2 и 3 совместно с частью ДЭП образуют кондуктометрическую ячейку (КЯ), электрические параметры которой фактически характеризуют электрические параметры ДЭП. При этом на электрод 2 подается переменное синусоидальное напряжение, а электрод 3 имеет точку соединения «а» с электрической обмоткой 5 дросселя. В этом случае точка соединения «а» является выходом КЯ, с которой снимается информационный сигнал $\dot{U}_{\text{изм}}$.

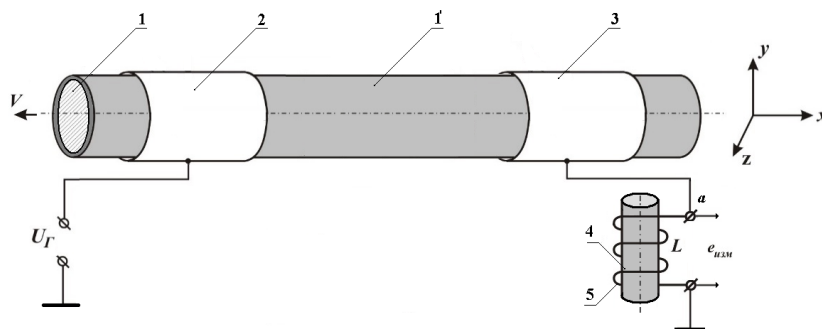


Рис. 2. Обобщенная схема способа неразрушающего контроля Fig. 2. Generalized scheme of the method of non-destructive testing

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

Электрическая схема замещения варианта схемотехнического решения представлена на рисунке 3, где части поверхностей металлической жилы круглого сечения 1, расположенные непосредственно под электродами 2 и 3, образуют с ними соответственно два ЦК C и C' , являясь при этом их внутренними электродами.

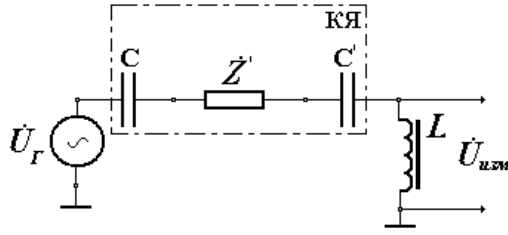


Рис. 3. Электрическая схема замещения варианта схемотехнического решения Fig. 3. Electrical equivalent circuit diagram of the circuit design variant

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

На внешний электрод 2 (рис. 2) ЦК C подается переменное синусоидальное напряжение $\dot{U}_r$, а внешний электрод 3 ЦК C' , соединяясь с дросселем с индуктивностью L , обеспечивает при этом соответствующее последовательное электрическое соединение ЦК с этим дросселем, которое в свою очередь по своей сути является резонансным индуктивно-емкостной полумостом. Использование дросселя с индуктивностью L , позволяет реализовать квазирезонансный режим функционирования индуктивно-емкостного полумоста, при котором его выходной сигнал $\dot{U}_{изм}$ достигает своего максимально возможного значения.

Основным функциональным элементом электрической схемы замещения является электрический контур, состоящий из последовательно соединенных КЯ и дросселя. Фактически КЯ образован ЦК C и C' соединенными между собой металлическим проводом с комплексным сопротивлением:

$$\dot{Z} = R + j \times X, \quad (9)$$

где R и X – соответственно активное и реактивное сопротивления контролируемого участка ДЭП.

Учитывая, что контролируемый участок ДЭП обладает относительно корпуса малозначимым реактивным сопротивлением, будем считать, что

$$\dot{Z} = R = \rho \times \lambda / s, \quad (10)$$

где ρ, λ и s – соответственно удельное сопротивление, длина и площадь поперечного сечения контролируемого участка металлической жилы круглого сечения 1 ДЭП.

Для более полного анализа процессов, происходящих в электрическом контуре, рассмотрим электрическую схему замещения варианта схемотехнического решения с учетом заполнения ЦК C и C' бинарной средой (рис. 4).

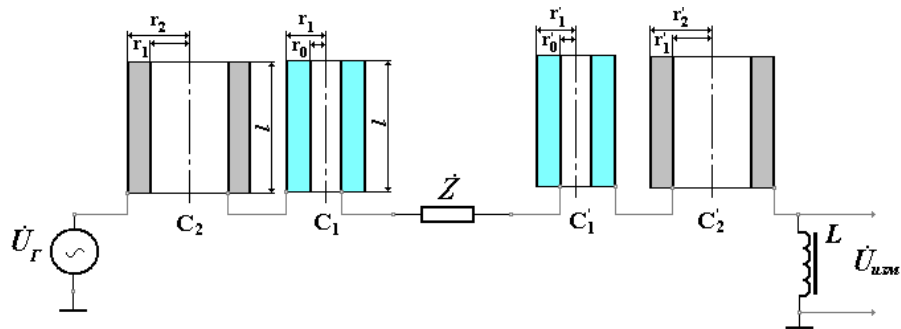


Рис. 4. Электрическая схема замещения электрического контура с бинарным заполнением ЦК Fig. 4. Electrical equivalent circuit of the electrical circuit with binary filling of a cylindrical capacitor

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

Аналогично выражениям (2) и (7), для ЦК C' можем соответственно записать:

$$\frac{1}{C'} = \frac{1}{C'_1} + \frac{1}{C'_2}, \quad C' = \frac{2\pi \times \epsilon_0 \times l}{D - \frac{\epsilon'_2 - 1}{\epsilon'_2} \times \frac{2\pi \times l \times G'_2}{g'_2}}. \quad (11)$$

Обобщая, можно констатировать следующее:

$$\dot{Z}_C = -j \times \frac{1}{\omega \times C} = -j \times \frac{1}{2\pi \times \omega \times \varepsilon_0 \times l} \times \left(D - \frac{\varepsilon_2 - 1}{\varepsilon_2} \times \frac{2\pi \times l \times G_2}{g_2} \right); \quad (12)$$

$$\dot{Z}_{C'} = -j \times \frac{1}{\omega \times C'} = -j \times \frac{1}{2\pi \times \omega \times \varepsilon_0 \times l} \times \left(D - \frac{\varepsilon'_2 - 1}{\varepsilon'_2} \times \frac{2\pi \times l \times G'_2}{g'_2} \right), \quad (13)$$

где ε'_2, g'_2 и G'_2 (аналогично ε_2, g_2 и G_2) – диэлектрическая проницаемость, удельное объемное электрическое сопротивление и объемное электрическое сопротивление для ДМ (диэлектрическая изоляция ДЭП), находящегося в межэлектродном пространстве ЦК C' .

Используя (12) и (13), определим импеданс для КЯ:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_Я = \dot{Z}_C + \dot{Z}_{C'} + \dot{Z}' &= R - j \times \frac{1}{2\pi \times \omega \times \varepsilon_0 \times l} \rightarrow \times \\ &\rightarrow \times \left(D - \frac{\varepsilon'_2 - 1}{\varepsilon'_2} \times \frac{2\pi \times l \times G'_2}{g'_2} + D - \frac{\varepsilon_2 - 1}{\varepsilon_2} \times \frac{2\pi \times l \times G_2}{g_2} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

После соответствующих преобразований выражения (14) получим соотношение вида:

$$\dot{Z}_Я = R - j \times \frac{1}{2\pi \times \omega \times \varepsilon_0 \times l} \times \left[2D - 2 \times \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \times \frac{\pi \times l \times (G'_2 + G_2)}{g} \right] = R + j \times K \times (G'_2 + G_2). \quad (15)$$

где $\varepsilon = \varepsilon_2 = \varepsilon'_2$; $g = g_2 = g'_2$; $K = \frac{\varepsilon - 1}{\omega \times \varepsilon_0 \times \varepsilon \times g}$ – постоянный конструктивный

коэффициент; $\frac{2D}{2\pi \times \omega \times \varepsilon_0 \times l}$ – сравнительно малая величина, которой можно пренебречь.

Определим импеданс рассматриваемого электрического контура:

$$\dot{Z}_0 = \dot{Z}_Я + \dot{Z}_Д = R + R_Д + j \times [K \times (G'_2 + G_2) + \omega \times L] \quad (16)$$

В запитываемом синусоидальным напряжением $\dot{U}_Г$ электрическом контуре, образованном КЯ и дросселем, создается соответствующий электрический ток:

$$\dot{I}_0 = \dot{U}_Г / \dot{Z}_0 \quad (17)$$

Подставив в (17) все необходимые составляющие, получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} \dot{I}_0 = \dot{U}_Г / \dot{Z}_0 &= \frac{\dot{U}_Г}{R + R_Д + j \times [K \times (G'_2 + G_2) + \omega \times L]} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \dot{U}_Г \times \frac{R + R_Д - j \times [K \times (G'_2 + G_2) + \omega \times L]}{(R + R_Д)^2 + [K \times (G'_2 + G_2) + \omega \times L]^2} \end{aligned} \quad (18)$$

После соответствующих преобразований (18) будем иметь:

$$\dot{I}_0 = \dot{U}_Г \times \frac{R + R_Д}{R_Д^2 + \omega^2 \times L^2} - \dot{U}_Г \times j \times \frac{K \times (G'_2 + G_2) + \omega \times L}{R_Д^2 + \omega^2 \times L^2} \quad (19)$$

В связи с тем, что угловая частота питающего напряжения $\dot{U}_Г$ выбирается равной ω_0 , при которой напряжение на индуктивности $\dot{U}_{изм}$ в последовательном колебательном индуктивно-емкостном контуре достигает своего наибольшего значения $\dot{U}_{тнзм}$, то для этого напряжения можем записать:

$$\dot{U}_{тнзм} = \dot{I}_0 \times \omega_0 \times L = \dot{U}_Г \times \frac{(R + R_Д) \times \omega_0 \times L}{R_Д^2 + \omega_0^2 \times L^2} - \dot{U}_Г \times j \times \frac{[K \times (G'_2 + G_2) + \omega_0 \times L] \times \omega_0 \times L}{R_Д^2 + \omega_0^2 \times L^2}, \quad (20)$$

где $\omega_0 = \omega_{рез} \times \sqrt{\frac{1}{1 - R_Д^2 \times C' / (2 \times L)}} = \omega_{рез} \times \sqrt{\frac{1}{1 - 1 / (2 \times \Theta^2)}}$, $\omega_{рез} = 1 / \sqrt{L \times C'}$ – резонансная угловая частота колебательного контура, $\Theta = \sqrt{L / C'} / R_Д$ – добротность колебательного контура.

С учетом того, что $\omega \times L / R_Д = Q$ является добротностью дросселя, выражение (20) несложно привести к следующему виду:

$$\dot{U}_{тнзм} = \dot{U}_Г \times \frac{(R + R_Д) \times Q}{R_Д(1 + Q^2)} - \dot{U}_Г \times j \times \left[\frac{K \times (G'_2 + G_2) \times Q}{R_Д(1 + Q^2)} + \frac{Q^2}{(1 + Q^2)} \right] \quad (21)$$

Из выражения (21) следует, что напряжение на индуктивности $\dot{U}_{u3M}$ содержит вещественную и мнимую составляющие, учитывая которые, выражение (21) можно представить в виде уравнения:

$$\dot{U}_{u3M} = \text{Re}(\dot{U}_{u3M}) + j \times \text{Im}(\dot{U}_{u3M}) \quad (22)$$

где $\text{Re}(\dot{U}_{u3M}) = F(R')$ – вещественная составляющая, являющаяся функцией активного сопротивления контролируемого участка металлической жилы круглого сечения 1 ДЭП; $\text{Im}(\dot{U}_{u3M}) = F(G)$ – мнимая составляющая, являющаяся функцией объемного электрического сопротивления изоляции 1' контролируемого участка ДЭП.

Анализ выражения (22) показывает, что рассмотренное техническое решение позволяет регистрировать электрический сигнал $\dot{U}_{u3M}$, содержащий информацию о текущих электрических параметрах контролируемого участка ДЭП.

Для определения $\text{Re}(\dot{U}_{u3M})$ и $\text{Im}(\dot{U}_{u3M})$ воспользуемся методом квадратурной демодуляции для измерения комплексных параметров информационного сигнала [30], структурная блок-схема которого представлена на рисунке 5, где: ГГС – генератор гармонического сигнала; ГКСС – генератор косинусно-синусного сигналов; СМ1 и СМ2 – соответственно смесители сигналов; ФНЧ1 и ФНЧ2 – фильтры низкой частоты.

Из запитывающего КЯ гармонического сигнала $u_r(t) = U_r \times \sin \omega_0 t$, поступающего от ГГС, посредством ГКСС формируются косинусно-синусные сигналы (той же частоты, что и информационный сигнал), являющиеся опорными напряжениями соответственно для СМ1 (первичный канал) и СМ2 (вторичный канал):

$$u_{oc}(t) = U_{oc} \times \cos(\omega_0 \times t); u_{os}(t) = U_{os} \times \sin(\omega_0 \times t). \quad (23)$$

В соответствии с функциональным назначением СМ1 и СМ2 и с учетом (23) для их выходных информационных сигналов можем соответственно записать:

$$\begin{aligned} u_{u3M}(t) \times u_{oc}(t) &= \frac{M_1 \times U_{u3M} \times U_{oc}}{2} \times \sin(\omega_0 \times t + \varphi_0) \times \cos(\omega_0 \times t + \varphi^*) \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{M_1 \times U_{u3M} \times U_{oc}}{2} \times [\sin(\varphi_0 - \varphi^*) + \sin(2 \times \omega_0 \times t + \varphi_0 + \varphi^*)]; \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} u_{u3M}(t) \times u_{os}(t) &= \frac{M_2 \times U_{u3M} \times U_{os}}{2} \times \sin(\omega_0 \times t + \varphi_0) \times \sin(\omega_0 \times t + \varphi^*) \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{M_2 \times U_{u3M} \times U_{os}}{2} \times [\cos(\varphi_0 - \varphi^*) - \cos(2 \times \omega_0 \times t + \varphi_0 + \varphi^*)] \end{aligned} \quad (25)$$

Анализ выражений (24) и (25) говорит о том, что в выходных сигналах СМ1 и СМ2 присутствуют как постоянные составляющие, так и составляющие, частоты которых вдвое превышают частоту питающего напряжения $\dot{U}_r$.

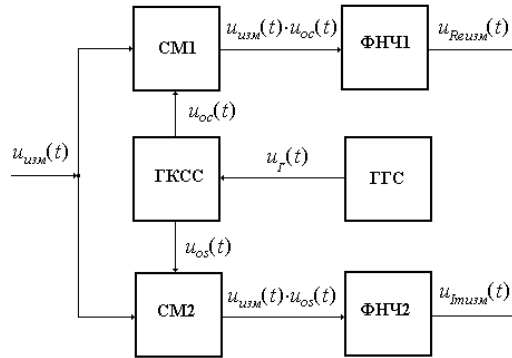


Рис. 5. Структурная блок-схема реализации метода квадратурной демодуляции

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

Сигналы с выходов СМ1 и СМ2 поступают на входы ФНЧ1 и ФНЧ2, выделяющие постоянные и подавляющие высокочастотные составляющие. В этом случае на выходах ФНЧ1 и ФНЧ2 КД с учетом (24) и (25) получим соответственно квадратурные составляющие в виде:

$$\begin{aligned} U_{Reизм} &= \frac{M_1 \times S_1 \times U_{изм} \times U_{OC}}{2} \times \cos(\varphi_0 - \varphi^*); \\ U_{Imизм} &= \frac{M_2 \times S_2 \times U_{изм} \times U_{OS}}{2} \times \sin(\varphi_0 - \varphi^*), \end{aligned} \quad (26)$$

где $M_1=M_2$ – коэффициенты преобразования смесителей сигналов; S_1 и S_2 – коэффициенты преобразования соответственно ФНЧ1 и ФНЧ2.

После соответствующего цифрового преобразования информационные сигналы (26) поступают в блок алгоритмической обработки сигналов, на выходах которого получают информацию о численных значениях параметров контролируемого участка ДЭП в соответствии со следующими алгоритмами:

$$R = \frac{U_{Reизм} \times R_d \times (1 + Q^2) - \dot{U}_r \times Q \times R_d}{\dot{U}_r \times Q}; G = \frac{U_{Imизм} \times R_d \times (1 + Q^2) - \dot{U}_r \times Q^2 \times R_d}{\dot{U}_r \times K \times Q}. \quad (27)$$

По вычисленным в соответствии с алгоритмами (27) значениям R и G оцениваются техническое состояние контролируемого ДЭП.

Структурная блок-схема варианта аппаратной реализации описанного способа оперативного неразрушающего контроля представлена на рисунке 6, где ОК – образец контроля; Γ – генератор возбуждающего напряжения $\dot{U}_r$; ФОН – формирователь опорных напряжений; КЯ – кондуктометрическая ячейка; Д – дроссель; У – усилитель; СД и КД – соответственно синфазный и квадратурный детекторы; ВМ – вычислительный модуль; БИП – блок исходных данных; $\dot{U}$ – масштабированное измеренное напряжение.

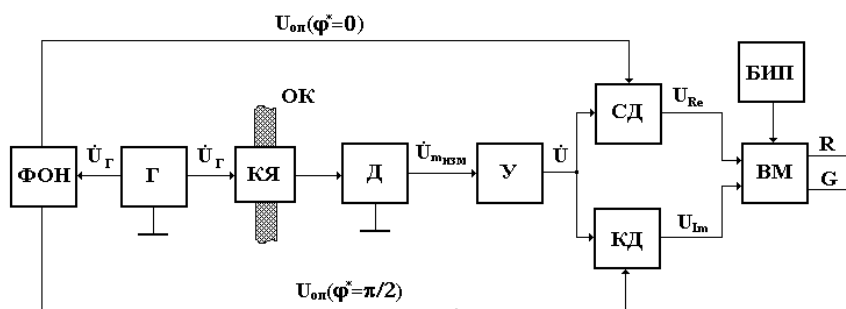


Рис. 6. Блок-схема аппаратной реализации способа оперативного неразрушающего контроля
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Разработка способа оперативного неразрушающего допускового контроля параметров электрических кабелей

На основании сделанных выводов и проведенного анализа варианта схмотехнического решения можно предложить новый способ оперативного неразрушающего допускового контроля параметров электрических кабелей. Пример реализации данного способа представлен на рисунке 7.

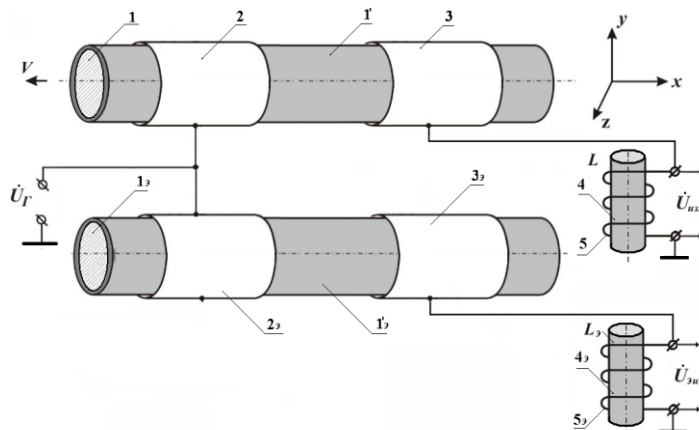


Рис. 7. Обобщенная схема способа оперативного допускового неразрушающего контроля
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Основными функциональными элементами данного способа являются два измерительных контура, запитываемых синусоидальным напряжением $\dot{U}_r$.

Первый измерительный контур (рабочий) состоит из следующих конструктивных элементов: 1 и 1' – соответственно, контролируемый участок металлической жилы круглого сечения исследуемого ДЭП и диэлектрическая изоляция этого участка; 2 и 3 – металлические цилиндрические внешние электроды соответственно ЦК С и ЦК С'; L, 4 и 5 – соответственно индуктивность, магнитопровод и электрическая обмотка дросселя первого контура; $U_{изм}$ – информационный сигнал, снимаемый с обмотки 5 дросселя первого контура.

Второй измерительный контур (эталонный) содержит следующие конструктивные элементы: 1э и 1э – соответственно участок металлической жилы круглого сечения эталонного электрического провода конечной длины (ЭПКД) и диэлектрическая изоляция этого участка; 2э и 3э – металлические цилиндрические внешние электроды соответственно ЦК Сэ и ЦК С'э; Lэ, 4э и 5э – соответственно индуктивность, магнитопровод и электрическая обмотка дросселя второго контура; $\dot{U}_{эизм}$ – информационный сигнал, снимаемый с обмотки 5э дросселя второго контура. Следует отметить, что все ЦК измерительных контуров обладают идентичными конструктивными параметрами, а в качестве ЭПКД берется отрезок электрического провода с известными электрическими параметрами однотипный контролируемому электрическому проводу.

Электрическая схема замещения варианта схемотехнического решения допускового неразрушающего контроля ДЭП представлена на рисунке 8.

Основная часть первого измерительного контура представляет собой рабочую кондуктометрическую ячейку КЯ_р, состоящую из ЦК С и ЦК С', которые в свою очередь соединены между собой исследуемым участком металлической жилы круглого сечения исследуемого ДЭП с соответствующей диэлектрической изоляцией и электрическим сопротивлением $\dot{Z}$.

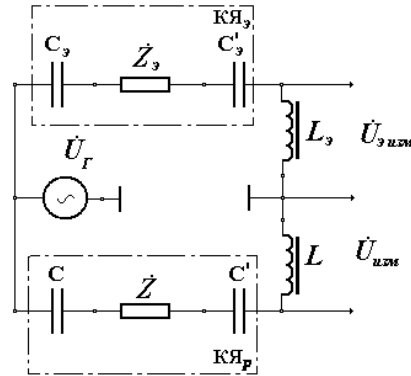


Рис. 8. Электрическая схема замещения Fig. 8. Electrical equivalent circuit diagram of the схемотехнического решения допускового circuit solution for non-destructive testing неразрушающего контроля

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

С учетом заполнения ЦК С и ЦК С' бинарной средой (воздух и диэлектрическая изоляция) для их электрических емкостей можем записать следующее:

$$C = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} = \frac{2\pi \times \epsilon_0 \times l}{D - \frac{\epsilon_2 - 1}{\epsilon_2} \times \frac{2\pi \times l \times G_2}{g_2}};$$

$$C' = \frac{C'_1 \times C'_2}{C'_1 + C'_2} = \frac{2\pi \times \epsilon_0 \times l}{D - \frac{\epsilon'_2 - 1}{\epsilon'_2} \times \frac{2\pi \times l \times G'_2}{g'_2}}. \quad (28)$$

Аналогично первому измерительному контуру основная часть второго измерительного контура представляет собой эталонную кондуктометрическую ячейку КЯ_э, состоящую из ЦК Сэ и ЦК С'э, которые в свою очередь соединены между собой эталонным участком металлической жилы круглого сечения исследуемого ЭПКД с соответствующей диэлектрической изоляцией и электрическим сопротивлением $\dot{Z}_э$. Причем, все

электрические параметры эталонной кондуктометрической ячейки $KЯ_3$ заранее известны и имеют определенные нормированные значения, соответствующие ДЭП требуемого состояния качества. С учетом заполнения ЦК C_3 и ЦК C'_3 бинарной средой (воздух и диэлектрическая изоляция) выражения для электрических емкостей этих ЦК можем представить в виде:

$$C_3 = \frac{C_{13} \times C_{23}}{C_{13} + C_{23}} = \frac{2\pi \times \epsilon_0 \times l}{D - \frac{\epsilon_{23} - 1}{\epsilon_{23}} \times \frac{2\pi \times l \times G_{23}}{g_{23}}};$$

$$C'_3 = \frac{C'_{13} \times C'_{23}}{C'_{13} + C'_{23}} = \frac{2\pi \times \epsilon_0 \times l}{D - \frac{\epsilon'_{23} - 1}{\epsilon'_{23}} \times \frac{2\pi \times l \times G'_{23}}{g'_{23}}}. \quad (29)$$

Аналогично выражению (21) для первого и второго измерительных контуров можем соответственно записать:

$$\dot{U}_{изм} = \dot{U}_Г \times \frac{(R + R_d) \times Q}{R_d(1 + Q^2)} - \dot{U}_Г \times j \times \left[\frac{K \times (G'_2 + G_2) \times Q}{R_d(1 + Q^2)} + \frac{Q^2}{(1 + Q^2)} \right];$$

$$\dot{U}_{эизм} = \dot{U}_Г \times \frac{(R_э + R_d) \times Q}{R_d \times (1 + Q^2)} - \dot{U}_Г \times j \times \left[\frac{K \times (G'_{2э} + G_{2э}) \times Q}{R_d \times (1 + Q^2)} + \frac{Q^2}{(1 + Q^2)} \right]. \quad (30)$$

Определим разностную величину между $\dot{U}_{изм}$ и $\dot{U}_{эизм}$ в соответствии с выражением вида:

$$\Delta \dot{U}_{изм} = \dot{U}_{эизм} - \dot{U}_{изм} = \dot{U}_Г \times \frac{Q}{R_d(1 + Q^2)} \times \Delta R - \dot{U}_Г \times j \times \frac{K \times Q}{R_d(1 + Q^2)} \times \Delta G \quad (31)$$

Перепишем (31) в более обобщенном виде:

$$\Delta \dot{U}_{изм} = Re(\Delta \dot{U}_{изм}) + j \times Im(\Delta \dot{U}_{изм}) \quad (32)$$

Для определения $Re(\Delta \dot{U}_{изм})$ и $Im(\Delta \dot{U}_{изм})$ воспользуемся также методом квадратурной демодуляции для измерения комплексных параметров информационного сигнала (рис. 4). Тогда в результате несложных преобразований получим:

$$\Delta U_{Reизм} = \frac{M_1 \times S_1 \times U_{изм} \times U_{OC}}{2} \times \cos(\varphi_0 - \varphi^*);$$

$$\Delta U_{Imизм} = \frac{M_2 \times S_2 \times U_{изм} \times U_{OS}}{2} \times \sin(\varphi_0 - \varphi^*), \quad (33)$$

В соответствии с (31) и (33) можем записать:

$$\Delta R = \frac{\Delta \dot{U}_{Reизм} \times R_d \times (1 + Q^2)}{\dot{U}_Г \times Q}; \Delta G = \frac{\Delta \dot{U}_{Imизм} \times R_d \times (1 + Q^2)}{\dot{U}_Г \times K \times Q}. \quad (34)$$

По результатам сопоставления вычисленных значений разностных величин ΔR и ΔG с соответствующими заданными эталонными (допусковыми) величинами $\Delta R_э$ и $\Delta G_э$ принимается решение о соответствии контролируемого ДЭП заданным требованиям качества.

Структурная блок-схема варианта аппаратной реализации способа допускового неразрушающего контроля представлена на рисунке 9, где ОК_э – эталонный образец контроля; ОК_р – рабочий образец контроля; Г – генератор возбуждающего напряжения; ФОН – формирователь опорных напряжений; КЯ_э – эталонная кондуктометрическая ячейка; КЯ_р – рабочая кондуктометрическая ячейка; Д_э и Д_р – соответственно дроссель эталонной и рабочей ячеек; ИУ – инструментальный усилитель; СД и КД – соответственно синфазный и квадратурный детекторы; ВМ – вычислительный модуль; БИП – блок исходных данных; БПР – блок принятия решений.

Особенностью функционирования аппаратной реализации способа допускового неразрушающего контроля является использование инструментального усилителя (ИУ), имеющего дифференциальный вход и работающего в режиме масштабирующего вычитателя. В процессе выполнения ИУ процедурной операции определяется не только разностная величина между входными измерительными сигналами, но и осуществляется соответствующее подавление синфазной помехи, что существенно повышает точность измерительных преобразований в целом. Посредством БПР производится сопоставление вычисленных значений информативных параметров ΔR и ΔG с соответствующими заданными эталонными (допусковыми) величинами $\Delta R_э$ и $\Delta G_э$. В случае, если $\Delta R \geq \Delta R_э$ или

$\Delta G \geq \Delta G_0$, а также в случае выполнения условий обеих процедур сравнения принимается решение о наличии соответствующих локальных дефектов в структурных элементах ДЭП. Использование БИП позволяет вводить в ВМ все необходимые исходные данные для корректного выполнения всех необходимых вычислительных процедур в соответствии с используемыми алгоритмами расчета.

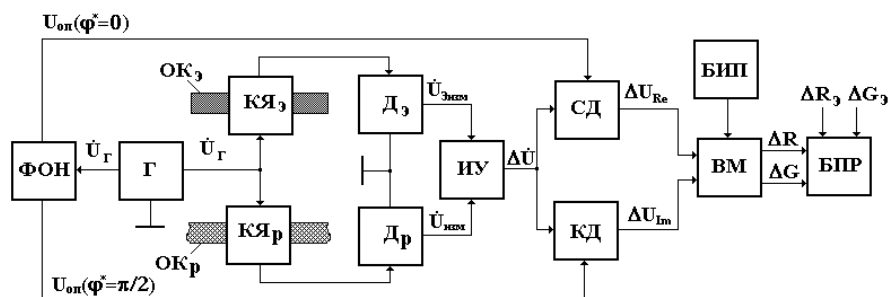


Рис. 9. Блок-схема аппаратной реализации способа допускового неразрушающего контроля
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Заключение (Conclusion)

В работе показано, что использование электроемкостного метода позволяет выполнить контроль емкости кабельного изделия, которая является одной из физических величин, определяющих оценить их качество. Это объясняется тем, что емкость изолированного провода зависит как от геометрических размеров его токопроводящих жил, так и от электрических свойств изоляции, поэтому контролируя изменение емкости можно определить отклонения как электрических, так и геометрических параметров кабеля от нормируемых величин.

На базе этого метода предложен и теоретически обоснован новый комплексный способ контроля параметров электрических кабелей, позволяющий одновременно осуществлять контроль как электропроводящих элементов, так и изоляции кабеля. Для контроля на исследуемый участок металлической жилы круглого сечения с диэлектрической изоляцией накладывают два соосно расположенных и разнесенных на определенное расстояние разъемные цилиндрические электроды, которые совместно с контролируемой частью провода образуют кондуктометрическую ячейку. Показано, что электрическая емкость этой ячейки характеризует электрические параметры провода, которые получают из измеренного информационного сигнала методом квадратурной демодуляции.

При этом научная новизна и практическая значимость исследования состоит в использовании резонансных свойств низкочастотной кондуктометрической емкостной ячейки, содержащей в качестве дополнительного элемента электрический дроссель и два цилиндрических электрода с размещенным внутри кабелем. Дроссель, соединенный последовательно с одним из электродов, образует последовательный колебательный контур кондуктометрической ячейки, функционирующей в квазирезонансном режиме, при котором ее выходной информационный сигнал достигает своего максимально возможного значения. При этом доказано, что вещественная составляющая этого сигнала является функцией активного сопротивления контролируемого участка металлической жилы кабеля, а его мнимая составляющая является функцией объемного электрического сопротивления изоляции кабеля.

Разработана структурная блок-схема реализации данного способа. Показано, что предложенное техническое решение позволяет регистрировать электрический сигнал, содержащий информацию о текущих электрических параметрах контролируемого участка электрического кабеля, по которым можно оценить техническое состояние его токопроводящих элементов и изоляции.

На базе этого способа разработан способ оперативного допускового контроля параметров электрических кабелей с использованием в качестве базового критерия параметры эталонного отрезка конечной длины контролируемого кабеля без дефектов.

Основными преимуществами разработанных способов являются следующие:

- обеспечение неразрушающей бесконтактной диагностики кабеля без ухудшения его эксплуатационных характеристик;
- возможность проведения контроля как на неподвижных, так и на движущихся

(например, в процессе изготовления) кабелях, причем точность и достоверность контроля не зависит от величины и равномерности скорости перемещения кабеля;

– использование электродов в виде разъемных полуцилиндров, что позволяет использовать данные способы контроля в реальном масштабе времени как при изготовлении кабеля, так и на действующих кабельных линиях без нарушения их целостности;

– возможность создания простых систем отбраковки кабеля, имеющего параметры, выходящие за допустимые пределы без предварительного введения в систему предельно допустимых параметров, т.к. все электрические параметры эталонной кондуктометрической ячейки заранее известны и имеют определенные нормированные значения, соответствующие кабелю с требуемым состоянием качества.

– простота в использовании при контроле параметров как в процессе изготовления кабеля в заводских условиях или его отбраковки в процессе укладки, так и в условиях эксплуатации.

Следует также отметить, что разработанный способ может быть использован не только для диагностики электрических кабелей и проводов, но и для других металлических изделий с большой длиной и малым поперечным сечением круглой формы, имеющих внешнее покрытие или оболочку из изоляционных материалов, обеспечивающих защиту от агрессивного воздействия внешней среды, например, металлополимерных тросов, проволок, стержней и т.п.

Таким образом, по сравнению с известными разработанные способы контроля обеспечивают не только расширение эксплуатационных возможностей за счет комплексного контроля как электропроводящих, так и электроизоляционных свойств кабельной продукции, но и расширение области их применения.

Литература

1. Бадалян Н. П., Колесник Г. П., Андрианов Д. П., Чебрякова Ю. С. Кабельные и воздушные линии электропередачи. Владимир: ВлГУ, 2019. 259 с.
2. Дмитриев М.В. Кабельные линии высокого напряжения. Санкт-Петербург: "Политех-Пресс", 2021. 688 с.
3. Antony Ndolo, İsmail Hakkı Çavdar. Current state of communication systems based on electrical power transmission lines. Journal of Electrical Systems and Information Technology, 2021, 9. doi.org/10.1186/s43067-021-00028-9.
4. Брякин И.В., Бочкарев И.В., Корякин С.В. Адаптер-трансивер для ВЧ-аппаратуры PLC-технологий // Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика, 2020, Т. 20, № 3. С. 97-107. DOI: <http://dx.doi.org/10.14529/power200310>.
5. Гранкина С.В., Гиниатуллин А.Р., Крючкова Н.А. Развитие мирового рынка кабельно-проводниковой продукции // Экономика и предпринимательство, 2022, № 9 (146). С. 178-182.
6. Бадалян Н. П., Колесник Г. П., Андрианов Д. П., Чебрякова Ю. С. Кабельные и воздушные линии электропередачи. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2019. 260 с.
7. Перцев Ю.А., Писаревский Ю.В. Техника высоких напряжений. Воронеж: ВГТУ, 2013. 107 с.
8. Буланенков В. А. Факторы, влияющие на старение изоляции в электротехнических устройствах // 2023. №29 (127).
9. Холодный С.Д., Серебрянников С.В., Боев М.А. Методы испытаний и диагностики в электроизоляционной и кабельной технике. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 232 с.
10. Брякин И. В., Бочкарев И. В. Неразрушающий контроль металлических длинномерных объектов. Lambert Academic Publishing, 2021. 177 с.
11. Пантелеев А.С., Словесный С.А. Неразрушающие способы оценки состояния изоляции высоковольтных силовых кабелей // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения), Материалы Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции. Том I. 2019, С. 54-56.
12. Виноградов А.А., Стрекозова М.В. Диагностика и контроль силовых кабелей // КИП и автоматика: Обслуживание и ремонт, 2020, № 3. С. 26-30.
13. Сайфутдинов З.Г., Башмаков Д.А., Ильин В.И. Система мониторинга и диагностики электрических кабелей // Приборы. 2023. № 9 (279). С. 46-50.
14. Кузьмин Д.Г., Кравченко Г.А., Львова Э.Л., и др. Метод контроля состояния кабельной линии и её основных элементов в рабочем режиме // Вестник Чувашского университета. 2019. № 3. С. 127-132.

15. Балобанов Р.Н., Булатова В.М., Крючков Н.С., Шафиков И.И. Оптимизация систем мониторинга силовых кабельных линий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т.26. No 4. С. 89-99. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-89-99.
16. Banerjee S., Drapeau J. -F. Diagnostic Accuracy and Technical Considerations for MV Cable Field Partial Discharge Measurements, 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Kitakyushu, Japan, 2022, pp. 24-33, doi: 10.23919/CMD54214.2022.9991454.
17. Lee H. M., Lee G. S., Kwon G. -Y., et al. Industrial Applications of Cable Diagnostics and Monitoring Cables via Time-Frequency Domain Reflectometry, in IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 2, pp. 1082-1091, 15 Jan.15, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.2997696.
18. Брякин И. В., Бочкарев И. В., Храмин В.Р. Разработка нового метода дефектоскопии электрических кабелей // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №4(41). С. 4-10. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-4(41)-4-10.
19. Бочкарев И.В., Брякин И.В. Оперативный контроль качества электропроводящих элементов кабеля // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2(47). С. 55-63. doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-55-63.
20. Атрашенко О.С., Скорикова Е.М. Современные методы контроля изоляции кабелей // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2017. № 2 (19). С. 36-40.
21. Пантелеев А.С., Словесный С.А. Неразрушающие способы оценки состояния изоляции высоковольтных силовых кабелей // В сборнике: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бернардосовские чтения). Материалы Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции. 2019. С. 54-56.
22. Auzanneau F. Wire troubleshooting and diagnosis: Review and perspectives. 2013Progress In Electromagnetics Research, 2013, В 49:253-279. DOI:10.2528/PIERB13020115.
23. Редько, В.В. Электроискровой контроль качества изоляции кабельных изделий: монография. Томск: Изд-во ТПУ, 2013. 928 с.
24. Vavilova G., Yurchenko V., Keyan L. Influence of the Insulation Defects Size on the Value of the Wire Capacitance. In: Minin, I.V., Uchaikin, S., Rogachev, A., Starý, O. (eds) Progress in Material Science and Engineering. Studies in Systems, Decision and Control, 2021, vol 351. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-030-68103-6_11.
25. Гольдштейн А.Е., Вавилова Г.В., Белянков В.Ю. Электроемкостный измерительный преобразователь для технологического контроля погонной емкости электрического кабеля в процессе производства // Дефектоскопия. 2015. № 2. С. 35-43.
26. Li C. et al. Experimental study of XLPE power cable insulation detection based on the electrical capacitance tomography sensor, 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Wuhan, China, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510556.
27. Batalović M., Zildžo H., Matoruga H., et al. Detection of Defect Presence inside the Insulation of Cable Accessories through Changes in Cable Capacitance, 2019 XXVII International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICAT47117.2019.8938874.
28. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khrashin V.R., Gasiyarov V.R., Liubimov I.V. Power transformer condition monitoring based on evaluating oil proper-ties / /Machines. Basel: 2022. Т. 10. № 8. С. 630. (Scopus).
29. Брякин И.В., Бочкарев И.В., Гунина М.Г., Иззатов А.Ж. Разработка и исследование системы оперативного контроля качества трансформаторного масла // Проблемы автоматики и управления, 2023. № 1 (46). С. 46-58.
30. Глушков А. Н., Литвиненко В. П., Литвиненко Ю. В. Цифровые алгоритмы обнаружения и демодуляции радиосигналов. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2020. 153 с.

Авторы публикации

Брякин Иван Васильевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией «Информационно-измерительные системы», Институт машиноведения, автоматики и геомеханики Национальной академии наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>. E-mail: bivas2006@yandex.ru

Бочкарев Игорь Викторович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика», Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>. E-mail: elmech@mail.ru

Храмин Вадим Рифхатович – д-р техн. наук, профессор, директор института энергетики и автоматизированных систем, Магнитогорский государственный технический университет

им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0972-2803>. E-mail: hvrnmg@gmail.com

References

1. Badalyan N. P., Kolesnik G. P., Andrianov D. P., Chebryakova Yu. S. Cable and overhead power transmission lines. - Vladimir: VISU, 2019. 259 p. (In Russ).
2. Dmitriev M. V. High-voltage cable lines. St. Petersburg: "Polytech-Press", 2021. 688 p. (In Russ).
3. Antony Ndolo, İsmail Hakkı Çavdar. Current state of communication systems based on electrical power transmission lines. Journal of Electrical Systems and Information Technology, 2021, 9. (In Russ). doi.org/10.1186/s43067-021-00028-9.
4. Bryakin I. V., Bochkarev I. V., Koryakin S. V. Adapter-transceiver for HF equipment of PLC technologies // Bulletin of SUSU. Series "Power Engineering", 2020, Vol. 20, No. 3. P. 97-107. (In Russ). doi: <http://dx.doi.org/10.14529/power200310>.
5. Grankina S.V., Giniatullin A.R., Kryuchkova N.A. Development of the world market of cable and wire products // Economy and Entrepreneurship, 2022, No. 9 (146). P. 178-182. (In Russ).
6. Badalyan N.P., Kolesnik G.P., Andrianov D.P., Chebryakova Yu.S. Cable and overhead power transmission lines. – Vladimir: Publishing house of VISU, 2019. 260 p. (In Russ).
7. Pertsev Yu.A., Pisarevsky Yu.V. High Voltage Engineering. - Voronezh: VSTU, 2013. 107 p. (In Russ).
8. Bulanenkova V.A. Factors Affecting the Aging of Insulation in Electrical Devices // 2023. No. 29 (127). (In Russ).
9. Kholodny S.D., Serebryannikov S.V., Boev M.A. Testing and Diagnostic Methods in Electrical Insulation and Cable Engineering. Moscow: MPEI Publishing House, 2016. 232 p. (In Russ).
10. Bryakin I.V., Bochkarev I.V. Non-destructive Testing of Long Metal Objects. Lambert Academic Publishing, 2021. 177 p.
11. Pantelev A.S., Slovesny S.A. Non-destructive methods for assessing the insulation condition of high-voltage power cables // State and prospects for the development of electrical and thermal technology (Benardos readings), Proceedings of the International (XX All-Russian) scientific and technical conference. Vol. I. 2019, pp. 54-56. (In Russ).
12. Vinogradov A.A., Strekozova M.V. Diagnostics and control of power cables // Instrumentation and automation: Maintenance and repair, 2020, No. 3. pp. 26-30. (In Russ).
13. Saifutdinov Z.G., Bashmakov D.A., Ilyin V.I. System for monitoring and diagnostics of electrical cables // Devices. 2023. No. 9 (279). P. 46-50. (In Russ).
14. Kuzmin D.G., Kravchenko G.A., Lvova E.L., Makarov A.M., Stolyarov S.V. Method for monitoring the condition of a cable line and its main elements in operating mode // Bulletin of the Chuvash University. 2019. No. 3. P. 127-132. (In Russ).
15. Balabanov R.N., Bulatova V.M., Kryuchkov N.S., Shafikov I.I. Optimization of power cable line monitoring systems // News of higher educational institutions. PROBLEMS OF ENERGY. 2024. Vol.26. No. 4. Pp. 89-99. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-89-99.
16. Banerjee S., Drapeau J. -F. Diagnostic Accuracy and Technical Considerations for MV Cable Field Partial Discharge Measurements, 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Kitakyushu, Japan, 2022, pp. 24-33, doi: 10.23919/CMD54214.2022.9991454.
17. Lee H. M., Lee G. S., Kwon G. -Y., et al. Industrial Applications of Cable Diagnostics and Monitoring Cables via Time-Frequency Domain Reflectometry, in IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 2, pp. 1082-1091, 15 Jan.15, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.2997696.
18. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R. Development of a New Method for Flaw Detection of Electric Cables // Electrical Systems and Complexes. 2018. No. 4(41). P. 4-10. (In Russ). doi: 10.18503/2311-8318-2018-4(41)-4-10.
19. Bochkarev I.V., Bryakin I.V. Operational quality control of conductive cable elements // Electrical systems and complexes. 2020. No. 2 (47). P. 55-63. (In Russ). doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-55-63.
20. Atrashchenko O.S., Skorikova E.M. Modern methods of cable insulation control // Energy and resource saving: industry and transport. 2017. No. 2 (19). P. 36-40. (In Russ).
21. Pantelev A.S., Slovesny S.A. Non-destructive methods for assessing the insulation condition of high-voltage power cables // In the collection: Status and prospects for the development of electrical and thermal technology (Benardos readings). Proceedings of the International (XX All-Russian) Scientific and Technical Conference. 2019. P. 54-56. (In Russ).
22. Auzanneau F. Wire troubleshooting and diagnosis: Review and perspectives. 2013Progress In Electromagnetics Research, 2013, B 49:253-279. DOI:10.2528/PIERB13020115.
23. Redko, V.V. Electrospark testing of cable insulation quality: monograph. Tomsk: TPU Publishing House, 2013. 928 p. (In Russ).

24. Vavilova G., Yurchenko V., Keyan L. Influence of the Insulation Defects Size on the Value of the Wire Capacitance. In: Minin, I.V., Uchaikin, S., Rogachev, A., Starý, O. (eds) Progress in Material Science and Engineering. Studies in Systems, Decision and Control, 2021, vol 351. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68103-6_11.

25. Goldstein A.E., Vavilova G.V., Belyankov V.Yu. Electrocapacitive measuring transducer for technological control of linear capacitance of electric cable during production // Defectoscopy. 2015. No. 2. pp. 35-43. (In Russ).

26. Li C. et al. Experimental study of XLPE power cable insulation detection based on the electrical capacitance tomography sensor, 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Wuhan, China, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510556.

27. Batalović M., Zildžo H., Matoruga H., et al. Detection of Defect Presence inside the Insulation of Cable Accessories through Changes in Cable Capacitance, 2019 XXVII International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICAT47117.2019.8938874.

28. Glushkov A. N., Litvinenko V. P., Litvinenko Yu. V. Digital algorithms for detection and demodulation of radio signals. Voronezh: Publishing house of VSTU, 2020. 153 p. (In Russ).

29. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R., Gasiyarov V.R., Liubimov I.V. Power transformer condition monitoring based on evaluating oil proper-ties / /Machines. Basel: 2022. Vol. 10. No. 8. P. 630. (Scopus).

30. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Gunina M.G., Izzatov A.Zh. Development and study of the system for operational quality control of transformer oil // Problems of automation and control, 2023. No. 1 (46). P. 46-58 (In Russ).

Authors of the publication

Ivan V. Bryakin – Institute of Mechanical Engineering, Automation and Geomechanics of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>. E-mail: bivas2006@yandex.ru

Igor V. Bochkarev – Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova, Bishkek, Kyrgyzstan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>. E-mail: elmech@mail.ru

Vadim R. Khramshin – Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0972-2803>. E-mail: hvrnmg@gmail.com

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

Получено 20.01.2025 г.

Отредактировано 29.01.2025 г.

Принято 04.02.2025 г.



РАЗРАБОТКА МНОГОСЛОЙНЫХ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ МАГНИТНЫХ СБОРОК ХАЛБАХА ДЛЯ ПМР-РЕЛАКСОМЕТРА НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТА

Нгуен Дык Ань, Кашаев Р.С., Козелков О.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

navupro1991@gmail.com

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Магнит является важным блоком в конструкции измерительно-аналитической техники, основанной на методах ядерного (протонного) магнитного резонанса. Большой объем межполюсного пространства и однородность магнитного поля являются – желательными качествами магнита, непосредственно влияющие на точность измерений. Магнитная сборка Халбаха (МСХ) являются перспективным типом магнитов и приоритетно исследуются для применения в новых поколениях портативных ПМР-релаксометров. Они обладают меньшими габаритами и массой, но создают значительно большее магнитное поле в зазоре по сравнению с дипольными магнитами той же массы и расстоянием между полюсами. Поэтому исследование и поиск решений для оптимизации параметров МСХ является актуальной задачей в рамках разработки усовершенствованных портативных ПМР-релаксометров. **ЦЕЛЬ.** Целью работы является исследование и определение факторов, влияющих на такие важные параметры магнита, как: масса, габариты, плотность магнитного потока и однородность магнитного поля в зазоре магнита и разработка математические уравнения для описания влияния этих факторов на параметры магнита. На основе результатов расчетов и моделирования в программном обеспечении практической целью было создать экспериментальный прототип МСХ для оценки и калибровки величин в математических уравнениях. **МЕТОД.** В качестве примененного метода была использована теория магнитных комбинаций, составленных из одинаковых магнитов, предложенная Клаусом Халбахом и другими исследователями в области магнитов, на основе которой разрабатываются соответствующие математические уравнения. Программное обеспечение для моделирования магнитных полей ANSYS Maxwell использовался для предварительной оценки теоретических расчетов. Применялся метод экспериментального исследования в сочетании со статистическим анализом для сбора и обработки данных в процессе испытаний на прототипе МСХ. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Результатом является разработка метода оптимизации параметров МСХ путем определения влияния факторов на параметры МСХ на основе расчетов и программного моделирования прототипа МСХ для проверки оптимизации. В рамках исследования было также разработано устройство для измерения значений магнитного поля в диапазоне 0–1.25 Т с разрешением 4 мВ/мТ, основанное на датчике Холла и плате Arduino, что стало дополнением исследований. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** На основе расчетов оптимизированных параметров по математической модели был разработан прототип МСХ. Он имеет массу 4.5 кг, размеры 140×140×120 мм и состоит из 10 уложенных друг на друга слоев кубических магнитов. Разработанный МСХ низкую цену, прост в изготовлении и сборке, а также обладает гибкостью изменения конструкции для регулировки значений магнитного поля в зазоре. При конструкции из 10 слоев плотность магнитного потока в зазоре достигает $B_0 = 0.344$ Тл с неоднородностью $\Delta B/B_0 = 2000$ ppm в объеме 6 см³ в центре зазора диаметре $d = 30$ мм. Значение плотности магнитного потока в зазоре МСХ аналогична величине в дипольных магнитах, используемых в релаксометрах ПМР-NP1 и ПМР-NP2, при этом масса и габариты значительно меньше.

Ключевые слова: магнитная сборка Халбаха (МСХ); неоднородность; плотность магнитного потока; экспресс-контроль; релаксометр; оптимизация; параметр.

Для цитирования: Нгуен Дык Ань, Кашаев Р.С., Козелков О.В. Разработка многослойных усовершенствованных магнитных сборок Халбаха для ПМР-релаксометра на основе оптимизации параметров магнита // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 20-32. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-20-32.

DEVELOPMENT OF AN IMPROVED MULTILAYER HALBACH ASSEMBLY MAGNET FOR PMR RELAXOMETRY BASED ON OPTIMIZATION OF MAGNET PARAMETERS

Nguyen Duc Anh, Kashaev R.S., Kozelkov O.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
navypro1991@gmail.com

Abstract: *RELEVANCE.* A magnet is an important block in the design of measuring and analytical equipment based on nuclear (proton) magnetic resonance methods. A large volume of interpolar space and homogeneity of the magnetic field are desirable qualities of a magnet, directly affecting the accuracy of measurements. The Halbach magnetic assembly (HMA) is a promising type of magnet and is a priority for research for use in new generations of portable PMR relaxometers. They have smaller dimensions and weight but create a significantly greater magnetic field in the gap compared to dipole magnets of the same mass and distance between the poles. Therefore, the study and search for solutions to optimize the HMA parameters is an urgent task in the development of improved portable PMR relaxometers. *OBJECTIVE.* The aim of the work is to study and determine the factors influencing such important magnet parameters as: mass, dimensions, magnetic flux density and homogeneity of the magnetic field in the magnet gap and to develop mathematical equations to describe the influence of these factors on the magnet parameters. Based on the results of calculations and software modeling, the practical goal was to create an experimental prototype of HMA for evaluating and calibrating the quantities in mathematical equations. *METHOD.* The applied method was the theory of magnetic combinations composed of identical magnets proposed by Klaus Halbach and other researchers in the field of magnets, based on which the corresponding mathematical equations are developed. ANSYS Maxwell magnetic field modeling software was used for preliminary evaluation of the theoretical calculations. An experimental study method was used in combination with statistical analysis to collect and process data during tests on the HMA prototype. *RESULTS.* The result is the development of a method for optimizing the HMA parameters by determining the influence of factors on the HMA parameters based on calculations and software modeling of the HMA prototype to test the optimization. As part of the study, a device for measuring magnetic field values in the range of 0–1.25 T with a resolution of 4 mV/mT based on a Hall sensor and an Arduino board was also developed, which complemented the research. *CONCLUSION.* Based on the calculations of optimized parameters using a mathematical model, a prototype of the HMA was developed. It weighs 4.5 kg, dimensions 140×140×120 mm, and consists of 10 layers of cubic magnets stacked on top of each other. The developed HMA has a low price, is easy to manufacture and assemble, and has the flexibility of changing the design to adjust the magnetic field values in the gap. With a design of 10 layers, the magnetic flux density in the gap reaches $B_0 = 0.344$ T with inhomogeneity $\Delta B/B_0 = 2000$ ppm in a volume of 6 cm³ in the center of the gap with a diameter of $d = 30$ mm. The value of the magnetic flux density in the HMA gap is like the value in the dipole magnets used in the PMR-NP1 and PMR-NP2 relaxometers, while the mass and dimensions are significantly less.

Keywords: Halbach magnetic assembly (HMA); non-uniformity; magnetic flux density; express control; relaxometer; optimization; parameter.

For citation: Nguyen Duc Anh, Kashaev R.S., Kozelkov O.V. Development of an improved multilayer Halbach assembly magnet for PMR relaxometry based on optimization of magnet parameters. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (2): 20-32. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-20-32.

Введение (Introduction)

Долгое время считалось, что нефтегазовая отрасль существенно отстает в использовании цифровых технологий [1-4]. Поэтому в последние годы особое внимание уделяется развитию цифровых нефтяных месторождений с возможностью автоматического контроля, всеобъемлющего и многопараметрического контроля физико-химических свойств (ФХС) нефти, таких как концентрация воды, нефти, газа, асфальта и т.д. [3, 4] и скважинной жидкости (СКЖ) [5]. Преимуществом аналитического метода на основе (протонного) ядерного магнитного резонанса (ПМР), являются его многопараметричность (по нескольким параметрам ЯМР), высокая производительность, неразрушающий контроль, не требующий

пробоподготовки и больших объемов пробоотбора. Метод измерения релаксации ЯМР стал одним из важнейших методов для экспресс-контроля и количественной оценки СКЖ и сырой нефти в потоке [5]. Одним из важнейших элементов оборудования для анализа и контроля параметров жидкости и нефти на основе ЯМР является магнитная система, характеризующаяся плотностью и однородностью магнитного поля в зазоре магнита, что является основой для определения погрешности анализов и измерений [6].

Развитие технологий в области материаловедения в начале 1980-х годов позволило создать новые магнитные материалы с составами, включающими редкоземельные элементы, такие как $NdFeB$ (Неодим-Железо-Бор) и $SmCo$ (Самарий-Кобальт). При этом магниты на основе $NdFeB$ обладают превосходными магнитными свойствами по сравнению с магнитами $SmCo$. Они способны создавать значительно более сильные магнитные поля по сравнению с традиционными дипольными литыми из твердых сплавов и ферритовыми магнитами. Однако при использовании конструкции дипольного магнита они являются слишком тяжёлыми для измерительных приборов, таких как портативные релаксометры на основе ЯМР. В 1980 году Клаус Хальбах предложил новую магнитную структуру, названную его именем – магнитная сборка Хальбаха (МСХ), в которой магнитная матрица собирается из множества одинаковых кубических постоянных магнитов с разными направлениями намагничивания, расположенным по определенным правилам [7]. Поэтому плотность магнитного поля значительно увеличивается в центре МСХ и уменьшается на его периферии. На основе этого принципа Рейх и Блюмлер в 2004 году предложили структуру МСХ для приложений ЯМР, включающую несколько отдельных кубических магнитов, которая получила название *NMR-Mandhalas* [8]. Преимущества, представленные в их исследованиях новой магнитной структуры, это небольшая масса и размеры, высокая плотность магнитного поля в зазоре по сравнению с дипольными магнитами, а также низкая магнитная дисперсия в окружающей среде [9]. Эти преимущества побудили авторов данной статьи выбрать структуру *NMR-Mandhalas* в качестве прототипа для дальнейших исследований по улучшению однородности и плотности магнитного поля в зазоре, с меньшей массой и размером.

На основе описанных задач определена цель исследования:

Целью исследования заключается в определении факторов и исследование их влияния на параметры МСХ, такие как масса, размеры, неоднородность и плотность магнитного поля в зазоре магнита и построении математических уравнений для описания этих взаимосвязей. Решениями этих уравнений являются оптимальные параметры структуры МСХ по массе, размерам, неоднородности и плотности магнитного поля. Это служит основой для проектирования экспериментального прототипа с небольшой массой и габаритами, но с однородностью и плотностью магнитного поля в зазоре, аналогичными магнитам резонансных приборов ПМР- NP_1 и ПМР- NP_2 при измерении времен продольной релаксации T_1 и времен спин-спиновой релаксации T_2 [10].

Научная значимость исследования заключается в определении факторов и изучении их влияния на габариты, массу, однородность и плотность магнитного поля в зазоре МСХ, и в их описание математическими уравнениями. Оптимальность математических уравнений проверяется с помощью моделирования и экспериментальных измерений, сбора и обработки данных, полученных на экспериментальной модели. Значимость заключается также в обосновании методологии MSK и точности математической модели для оптимизации конструкции МСХ. Использование программного обеспечения ANSYS Maxwell для моделирования магнитного поля в зазоре с различными структурами МСХ позволило выбрать вариант конструкции экспериментальной модели МСХ.

Практическая значимость исследования заключается в разработке методики расчета конструкции МСХ с использованием специализированного программного обеспечения для моделирования магнитного поля ANSYS Maxwell в предлагаемой структуре МСХ. Прототип магнитной сборки был разработан на основе результатов расчета оптимальных параметров. Оценка прототипе показывает, что разработанная структура МСХ имеет небольшую массу, напряженность и неоднородность магнитного поля, которые позволяют определять времена релаксации T_1 и T_2 в образцах СКЖ и сырой нефти. Одновременно для проведения измерений и сбора данных на экспериментальной модели МСХ на датчике Холла магнитного поля и плате Arduino было разработано устройство для измерения с высокой чувствительностью, стабильностью в широком диапазоне температур величины и однородности магнитных полей, позволяющее гибко рассчитывать параметры магнитов других конструкций. Результаты измерений и обработки данных показали, что экспериментальная структура MSX имеет небольшую массу, величину магнитного поля и

степень его неоднородности, достаточные для определения времен релаксации T_1 и T_2 в образцах СКЖ и сырой нефти.

Литературный обзор (Literature Review)

В своей публикации *Moresi* и *Magin* описали разработанную ими конструкцию портативной структуры МСХ [11]. Структура эта состоит из восьми цилиндрических редкоземельных магнитов типа $SmCo$ длиной 150 мм и диаметром 20 мм, установленных в каркасе из алюминия. Область с объемом $3 \times 3 \times 5$ мм³ расположена в центре зазора размерами 5 мм в высоту, 32 мм в ширину и 230 мм в длину, где плотность магнитного поля достигает $B_0 = 0.596$ Тл, а неоднородность составляет $\Delta B/B_0 = 20$ ppm. Такая однородность достигается за счет использования двух пластин из мягкого железа с высокой магнитной проницаемостью ($\mu > 10000$), расположенных перпендикулярно магнитному полю и закрепленных винтами. Недостатком конструкции является зазор шириной всего 5 мм, что ограничивает её применение для различных приложений.

Метод улучшения неоднородности магнитного поля в зазоре МСХ был опубликован *Soltner* и *Blümmler* [12] в их исследовании. В данной работе структура МСХ была построена из восьмиугольных магнитных элементов на основе структуры *NMR-Mandhalas*, представленной в [8]. Установка колец *Mandhalas* с соответствующим расстоянием существенно повысила однородность, достигнув значения $\Delta B/B_0 = 100$ ppm. Однако общая масса данной структуры МСХ оказалась слишком большой, достигая 300 кг. Кроме того, восьмиугольные редкоземельные магниты на рынке имеют очень высокую стоимость. Поэтому данная конструкция МСХ не подходит для мобильных и недорогих приложений ЯМР.

Усовершенствованное решение для улучшения однородности магнитного поля в зазоре магнитной структуры Хальбаха с использованием метода *Shimming* (активное улучшение однородности) представлено в публикациях *B. Blümich* и др. [13] и *Cooley, Stockmann* и др. [14]. Использование активных элементов шиммирования кольцами и катушками подмагничивания позволяет значительно улучшить однородность магнитного поля. Однако этот метод требует большого объема расчетов, изготовления и точной механической обработки. Поэтому он также малопригоден для широкого применения в недорогих проектах ЯМР-релаксометрии.

В своих публикациях Богайчук и коллеги [15] представили структуру МСХ с восемью квадратными магнитами $NdFeB$ типа *N27* размерами 10x10x100 мм, расположенными в два кольца. Для улучшения однородности зазора, магнитные элементы специально подбираются и располагаются один за другим до достижения наилучшей однородности. Результаты измерений показывают, что напряженность магнитного поля достигает $B_0 = 0.598$ Тл с неравномерностью $\Delta B/B_0 = 229$ ppm в области диаметром 4 мм и высотой 10 мм в центре зазора МСХ, при массе всего 0.6 кг. Однако этот метод во многом зависит от качества выбранных магнитов, погрешности их силы и направления намагничивания каждого магнита. Смена магнита требует переделки подбора и расстановки магнитных частей. Объем однородной области магнитного поля также очень мал. Этот метод применим только для релаксометров с диаметром катушки датчика меньше 4 мм и количеством магнитов менее восьми.

В 2020 году Свинин, Кашаев и Козельков представили в своей публикации небольшую конструкцию МСХ, состоящую из 16 магнитных стержней $NdFeB$ типа *N37* размером 0.5x0.5x40 мм [16]. Эта структура МСХ имеет небольшие размеры и массу не более 500 г при диаметре зазора данной магнитной структуры 30 мм. Однако плотность магнитного поля в центре зазора составляет $B_0 = 0.15$ Т, а неоднородность $\Delta B/B_0 = 11000$ ppm. При таком уровне магнитного поля и однородности использование данной конструкции в приборах для измерений, основанных на методе ЯМР оказывается недостаточно чувствительным при отсутствии специальных мер повышения однородности поля профилированными пластинами из электромагнитной стали.

На основе исследования и анализа представленных публикаций можно видеть, что текущие исследования в основном сосредоточены на улучшении неоднородности и плотности магнитного поля. В последующих частях статьи авторы представят метод определения и описания факторов, направленных на улучшение однородности и плотности магнитного поля в зазоре без увеличения массы и размеров МСХ. Разработанный прототип МСХ был параметрически оптимизирован экспериментами по измерениям времени поперечной релаксации T_2 некоторых образцов сырой нефти с использованием портативного релаксометра ПМР- NP_2 .

Материалы и методы (Materials and methods)

Идеальная структура МСХ представляет собой бесконечно длинный цилиндр, изготовленный из магнитотвердого материала, в котором магнитные компоненты непрерывно поляризованы таким образом, что вектор намагниченности поворачивается на 720° по окружности кольца (рис. 1а). Плотность магнитного поля в зазоре этой структуры определяется по формуле:

$$B_0 = B_r \frac{r_{\text{внеш}}}{r_{\text{внут}}} \quad (1)$$

где B_r – остаточная намагниченность используемого постоянного магнитного материала;

$r_{\text{внеш}}$ – внешний радиус идеального цилиндра Хальбаха (ЦХ);

$r_{\text{внут}}$ – внутренний радиус идеального ЦХ.

Структура ЦХ на рисунке 1б похожа на структуру на рисунке 1а, но в которой кольцо разделено на 16 равных частей и намагничено в соответствии с векторами, показанными на рисунке 1а. Однако данная структура все еще слишком сложна и дорога для изготовления, поэтому круговая структура МСХ, изготовленная из идентичных магнитов, называется *NMR-Mandhalas* (рис. 1в), представленная в [8], которая является основой для разработки авторами прототипа МСХ.

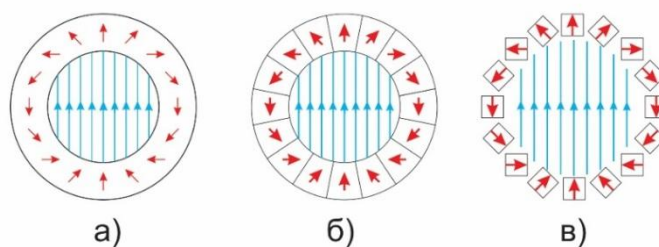


Рис. 1. Основные структурные формы ЦХ:

а) идеальный ЦХ, б) дискретная версия (а),
в) МСХ с 16 элементами

Fig. 1. The main structural forms of CH:

a) ideal CH, b) discrete version (a),
c) HMA with 16 elements

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

Понятия ЦХ и способ изготовления представлены на рисунке 2. Направление магнитного поля в зазоре ЦХ находится в плоскости xu и ориентировано вдоль оси x , что иллюстрируется красной стрелкой (рис. 2а). В отличие от ЦХ (рис. 2а), МСХ состоит из n идентичных постоянных магнитов, расположенных по кругу для имитации формы ЦХ (рис. 2б и 2в). Изначально значение n определялось как кратное 8 [8], однако с развитием технологий магнитных материалов было установлено, что значения n , кратные 2, при условии $n \geq 4$, являются достаточными для использования в МСХ.

В соответствии с числом n магнитных элементов направление намагничивания каждого магнита определяется двумя углами α_i и β_i (рис. 2б). Положение i -го магнита из общего числа n магнитов, расположенных по кругу, определяется углом $\alpha_i = \frac{2\pi * i}{n}$, а направление его намагничивания определяется углом $\beta_i = 2\alpha_i$.

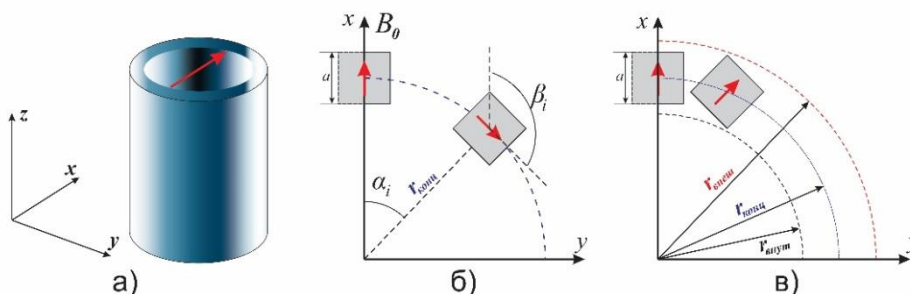


Рис. 2. Определение структуры ЦХ:

а) Определение системы координат. Конечный магнит образует цилиндр, ось которого направлена вдоль оси z , а основная составляющая магнитного поля ориентирована в направлении оси x ;

б) Принцип построения МСХ;

в) МСХ изготовлены из квадратных магнитов.

Fig. 2. Definition of the structure of the CH:

a) Definition of the coordinate system. The final magnet forms a cylinder, the axis of which is directed along the z axis, and the main component of the magnetic field is oriented in the direction of the x axis;

b) The principle of constructing HMA;

c) HMA are made of square magnets.

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

В структуре одного кольца МСХ значения внутреннего и внешнего радиусов в соответствии с формулой (1) определяются по формуле:

$$r_{\text{внеш}} = r_{\text{конц}} * (1 + \sqrt{2} * \Xi(n)) \quad (2)$$

$$r_{\text{внут}} = r_{\text{конц}} * (1 - \sqrt{2} * \Xi(n)) \quad (3)$$

где

$$\Xi(n) = \frac{\cos\left(\frac{2\pi}{n}\right) - \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) - \sqrt{2} * \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{4\pi}{n}\right)}{2 \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{4\pi}{n}\right) + \sqrt{2}} \quad (4)$$

$$r_{\text{конц}} = \frac{r_{\text{внут}} + r_{\text{внеш}}}{2} - \text{радиус круга проходит через центр магнитных элементов};$$

n – общее количество магнитных элементов в одном кольце МСХ.

Уравнение (1) показывает, что плотность магнитного поля в зазоре магнита обратно пропорциональна внутреннему радиусу МСХ. Из формул (2) и (3) видно, что значения внутреннего радиуса и внешнего радиуса зависят от количества магнитных элементов в базе МСХ. Поэтому для увеличения плотности магнитного поля в зазоре магнитные элементы необходимо располагать как можно ближе друг к другу.

При моделировании идеальной структуры ЦХ в программе *ANSYS Maxwell* с очень большим размером по оси z было показано, что однородность и плотность магнитного поля в зазоре близки к идеальным. Однако при уменьшении этого значения однородность и плотность магнитного поля значительно снижаются. Тем не менее, конструкция ЦХ с бесконечной высотой нереалистична и значительно увеличивает массу. В статьях [8, 9] указывается, что использование нескольких слоев МСХ, расположенных друг над другом, позволяет улучшить однородность и плотность магнитного поля по сравнению со слоистой структурой МСХ.

Для определения оптимальной высоты магнитной структуры, состоящей из множества уложенных друг на друга слоев МСХ, необходимо сначала рассмотреть значение плотности магнитного поля МСХ по вертикальной оси (вдоль оси z) [11]. В соответствии с этим значение плотности магнитного поля в зазоре вдоль оси z при $x = y = 0$, определяется по формуле:

$$B_{xy}(z) = \frac{r_{\text{конц}}^5}{\left(r_{\text{конц}}^2 + (z - z_0)^2\right)^{5/2}} B_{xy}(0) \quad (5)$$

где z – высота многослойного МСХ от центра.

В многослойной структуре МСХ плотность магнитного поля достигает максимума в центре структуры и постепенно уменьшается с обеих сторон вдоль оси z . Для расчета высоты L многослойной структуры МСХ уравнение (5) интегрируется по диапазону $z_0 = \pm L/2$. В этом случае коэффициент ослабления f_L магнитного поля в центре магнита при $z = 0$ определяется по следующей формуле:

$$f_L = \int_{-L/2}^{L/2} B_{xy}(z = 0, z_0) = \frac{L(L^2 - 6r_{\text{конц}}^2)}{(L^2 + 4r_{\text{конц}}^2)^{3/2}} \quad (6)$$

В центре структуры коэффициент уменьшения плотности магнитного поля $f_L = 0$. Таким образом, оптимальная высота многослойной структуры МСХ определяется по формуле:

$$L = r_{\text{конц}} * \sqrt{6} \quad (7)$$

Исследования, представленные в работах [15, 17, 18], описывают методы уменьшения неоднородности путем изменения различных способов размещения магнитных элементов для достижения наибольшей однородности. Более простой метод описан в [9]. Установка прокладок между слоями МСХ позволяет значительно улучшить однородность магнитного поля вдоль оси z . Размер подкладочного слоя между двумя слоями МСХ определяется суммарной плотностью центрального магнитного поля B_{xy}^{Σ} , создаваемого двумя слоями, расположенными на расстоянии d друг от друга. Значение плотности центрального магнитного поля B_{xy}^{Σ} в центре между двумя слоями МСХ определяется уравнением:

$$B_{xy}^{\Sigma}(0, 0, z) = \frac{r_{\text{конц}}^5}{\left(r_{\text{конц}}^2 + \left(z + \frac{d}{2}\right)^2\right)^{5/2}} B_{xy}(0, 0, 0) + \frac{r_{\text{конц}}^5}{\left(r_{\text{конц}}^2 + \left(z - \frac{d}{2}\right)^2\right)^{5/2}} B_{xy}(0, 0, 0) \quad (8)$$

Для улучшения однородности по оси z вторая производная центрального магнитного поля B_{xy}^{Σ} должна быть равна нулю при $z=0$. Это значение определяется по формуле:

$$\frac{\partial(B_{xy}^{\Sigma})^2}{\partial z^2} = 5r_{\text{конц}}^2 B_{xy} \left[\frac{6(z + d/2) - r_{\text{конц}}^2}{(r_{\text{конц}}^2 + (z + d/2)^2)^{9/2}} + \frac{6(z - d/2) - r_{\text{конц}}^2}{(r_{\text{конц}}^2 + (z - d/2)^2)^{9/2}} \right] = 0 \quad (9)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial(B_{xy}^{\Sigma})^2(0)}{\partial z^2} = 0 \quad \Rightarrow d = \pm \frac{2r_{\text{конц}}}{\sqrt{6}} \quad (10)$$

Значения L и d позволяют определить количество слоев МСХ, а также оптимальные размеры и массу всей многослойной структуры МСХ при сохранении максимальной однородности магнитного поля в зазоре. Для дальнейшего улучшения неоднородности магнитного поля без изменения массы и размеров многослойной структуры МСХ рассматривается тщательный выбор магнитных элементов и добавление пассивных элементов для смягчения поля. Тщательный выбор магнитных элементов был описан Богайчуком в его публикации [15]. Несмотря на промышленное производство, невозможно гарантировать одинаковые магнитные характеристики элементов даже в рамках одной партии. Поэтому проверка и отбор магнитных элементов с близкими характеристиками магнитного поля позволяет улучшить однородность и плотность магнитного поля в зазоре МСХ. Другой метод улучшения однородности магнитного поля заключается в использовании двух пластин из мягкого ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью, расположенных перпендикулярно магнитному полю в зазоре, как описано в работе [12]. Это простые методы, которые позволяют улучшить однородность магнитного поля в зазоре многослойной структуры МСХ.

В следующей части статьи авторы представляют результаты разработки и усовершенствования прототипа МСХ, основанные на теории МСХ и параметрах, используемых для оптимизации размеров, массы, неоднородности и плотности магнитного поля в зазоре многослойной структуры МСХ.

Результаты (Results)

Разработка и доработка прототипа МСХ

Для разработки собственной многослойной структуры МСХ авторы выбрали конфигурацию, включающую 16 магнитных элементов в одном кольце каждого слоя МСХ. Магнитные элементы $NdFeB$ были тщательно отобраны к типу N33 с габаритами $10 \times 10 \times 10$ мм. В центре каждого слоя измеренная плотность магнитного поля составила $B_0 = 68$ мТл. Авторы обнаружили, что при использовании нескольких концентрических колец МСХ плотность магнитного поля в центре значительно увеличивается. Для проверки надежности было выполнено моделирование с использованием программного обеспечения ANSYS Maxwell, результаты которого представлены на рисунке 3. Параметры настройки магнитных элементов соответствуют реальным характеристикам.

При использовании структуры МСХ, состоящей из одного кольца с 16 магнитными элементами (как в работе Кашаев, Свинин [16] – будет еще одна ссылка на журнал), плотность магнитного поля в центре достигает $B_0 = 0.145$ Тл (рис. 3а). При использовании структуры из трех соосных колец, каждое из которых состоит из 16 магнитных элементов, плотность магнитного поля в центре составляет $B_0 = 0.423$ Тл, что почти в 3 раза больше, чем в случае структуры с одним кольцом (рис. 3б). Это можно объяснить явлением наложения магнитных полей, где магнитное поле в центре является суммарным полем от трех колец. Результаты фактических измерений показали, что при такой структуре плотность магнитного поля достигает $B_0 = 0.101$ Тл, что более чем в 1.5 раза превышает значение по сравнению с $B_0 = 0.068$ л для структуры с одним кольцом. Однако этот результат оказался меньше, чем значение, полученное при моделировании.

Опорный каркас для магнитных элементов и прокладка между двумя слоями магнитных колец прототипа были спроектированы с использованием программного обеспечения (ПО) Solidworks. Это специализированное ПО для проектирования, которое обеспечивает точное 3D-проектирование деталей для 3D-принтеров с помощью высокоточных лазерных резаков (рис. 4).

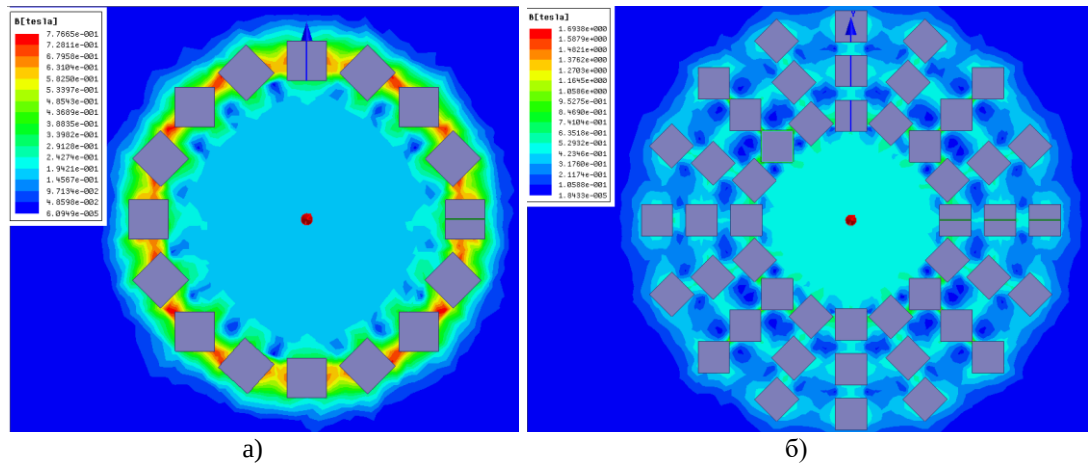


Рис. 3. Моделирование структуры MCX:

- а) MCX с одним кольцом;
б) MCX с тремя коаксиальными кольцами.

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

Fig. 3. Modeling of HMA structure:

- а) HMA with one ring;
б) HMA with three coaxial rings.

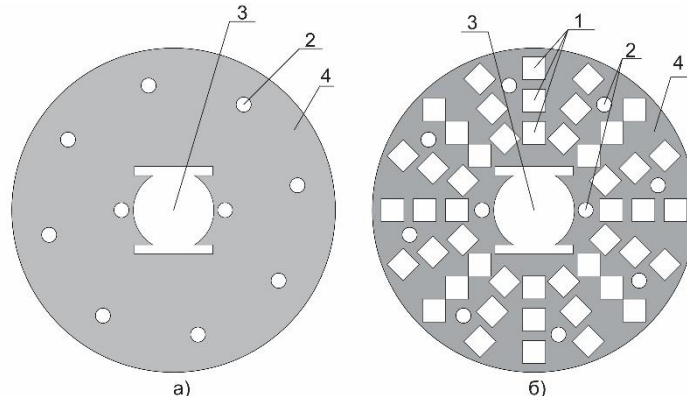


Рис. 4. Проектирование каркаса и прокладки для MCX:

- а) Прокладка между 2 слоями магнитных колец;
б) Каркас для установки магнитов для слоя колец:
1 – Квадратное отверстие для установки магнита;
2 – Отверстия для размещения и установки винтов, соединяющих слои;
3 – Зазор в центре MCX с 2 пазами для установки стержней из кремниевой стали с высокой магнитной проницаемостью;
4 – Каркас.

Fig. 4. Design of the frame and spacer for HMA:

- а) Laying between 2 layers of magnetic rings;
б) A frame for installing magnets for a layer of rings:
1 – Square hole for magnet installation;
2 – Holes for placement and installation of screws connecting the layers;
3 – HMA center gap with 2 slots for mounting silicon steel rods with high magnetic permeability;
4 – The frame.

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

Формулы (7) и (10) позволяют определить максимальную высоту многослойного прототипа MCX (МП MCX) и оптимальное расстояние между двумя слоями MCX. Многослойный прототип MCX состоит из 10 слоев MCX, расположенных друг над другом (рис. 5), с прокладками между слоями. Для устранения влияния затухания магнитного поля на верхнем и нижнем концах МП MCX, три слоя MCX без прокладок размещены над ними. Для повышения однородности магнитного поля используются пассивные решения, такие как размещение пластин из высокопроницаемого ферромагнитного материала в зазорах конструкции. Экспериментальные измерения показали однородность магнитного поля $\Delta B/B_0 = 2000 \text{ ppm}$ в объеме $1.2 \times 2.4 \times 2.0 = 5.76 \text{ см}^3$.

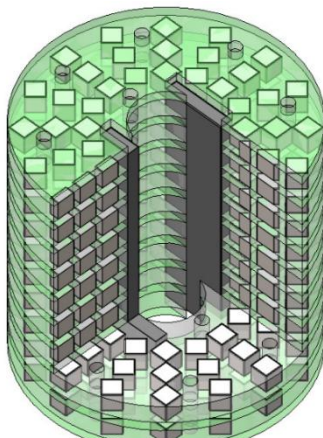


Рис. 5. Структура многослойного прототипа МСХ с 10 уложенными слоями Fig. 5. Structure of a multilayer HMA prototype with 10 stacked layers

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

Для уменьшения массы МП МСХ вместо ферритовых пластин были использованы листы из кремнистой стали для пассивного улучшения однородности. Эти листы обычно применяются в производстве трансформаторов благодаря их высокой магнитной проницаемости ($\mu_0 = 10000\text{--}15000$). Листы были разрезаны на более мелкие заготовки размером 120×35 мм, а края резки обработаны шлифовкой для удаления дефектов. Эти листы из кремнистой стали были плотно скреплены между собой, аналогично сердечникам трансформаторов, и помещены в заранее подготовленные пазы на каркасе МП МСХ. Слои МСХ и прокладок были надежно зафиксированы пластиковыми (или медными) винтами, чтобы избежать смещения и образования зазоров между слоями. Многослойный прототип МСХ имеет общие габариты (длина $\times$ ширина $\times$ высота) $14 \times 14 \times 12$ см и массу 4.5 кг.

Разработка оборудования для измерения магнитного поля

Прибор для измерения магнитного поля был разработан одновременно с процессом разработки МП МСХ в связи с тем, что в лаборатории отсутствуют приборы для измерения магнитного поля, а бюджета недостаточно для покупки их на рынке измерительных приборов с широким диапазоном измерений и чувствительностью до 0.4 мВ/мТл. Сердцем измерительного прибора является датчик магнитного поля Холла типа AD22151 от Analog Device. Это высокочувствительный датчик магнитного поля, имеющий встроенную в микросхему температурную компенсацию и хорошую помехозащищенность (рис. 6).

АЦП-преобразователь на Arduino имеющий разрешение 10 бит и частоту дискретизации 10 Кбит/с, позволяет легко считывать выходной сигнал датчика. Алгоритм, встроенный в Arduino, позволяет точно определять напряженность и изменение во времени магнитного поля. Данные измерения магнитного поля собираются на компьютере через последовательную связь между компьютером и Arduino.

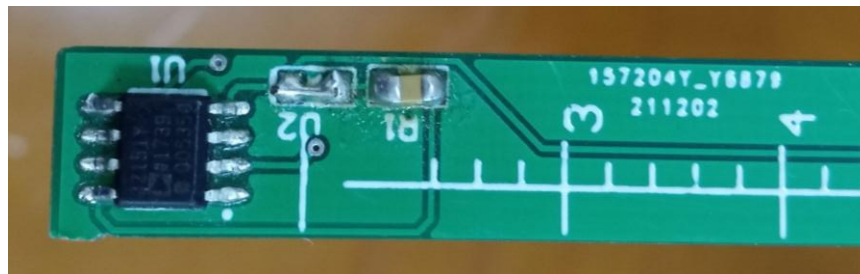


Рис. 6. Датчик AD22151 на измерительном штоте Fig. 6. AD22151 sensor on the measuring rod of the прибор для измерения магнитного поля magnetic field measuring device

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

Габариты разработанного датчика меньше по сравнению с аналогами и составляют $10 \times 10 \times 3$ мм, конструкции упростилась, диапазон измерений магнитного поля вырос до 1.25 Тл. Стоимость разработки прибора для измерения магнитного поля составила не более 3500 рублей.

Определение параметров магнитного поля МП МСХ

Важными параметрами магнитного поля МП МСХ являются плотность и неоднородность магнитного поля в зазоре по осям x , y , z . На рисунке 7 представлены результаты измерения плотности магнитного поля вдоль оси z . Плотность магнитного поля в центре зазора МСХ достигает $B_0 = 0.334$ Тл. Область однородного магнитного поля участка значительно расширена за счет пассивации фольгой из кремнистой стали и оптимизирована прокладками между слоями МСХ.

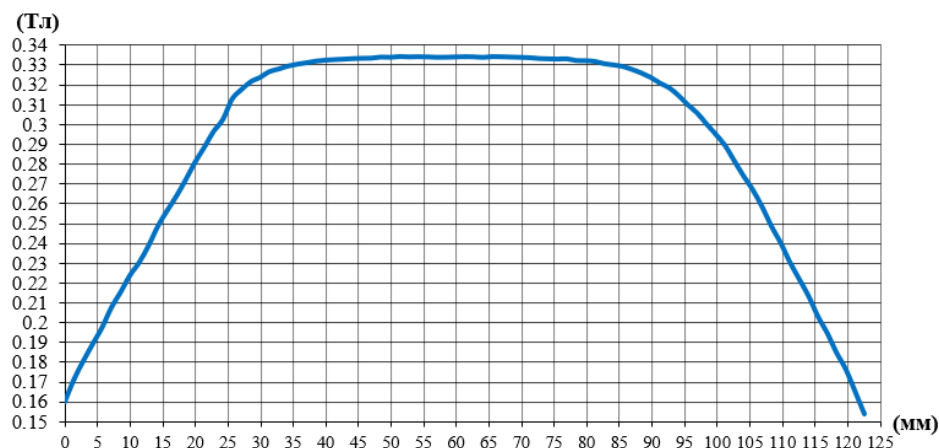


Рис. 7. График плотности магнитного поля в зазоре МП МСХ вдоль оси z Fig. 7. Graph of magnetic field density in the multilayer HMA prototype gap along the z axis

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

Измерения и расчеты для определения неоднородности показывают, что в области с габаритами 12×24×20 мм вокруг центра МП МСХ неоднородность магнитного поля достигает $\Delta B/B_0 = 2000 \text{ ppm}$. Это значение соответствует неоднородности магнитов, используемых для релаксметров ПМР- NP_1 и ПМР- NP_2 . По теории, напряженность магнитного поля $B_0 = 0.334 \text{ Тл}$ позволяет протонам в образце резонировать на частоте $\nu_0 = 14.22 \text{ МГц}$.

Для точной проверки резонансной частоты и возможности использования МП МСХ для портативных релаксметров, он был испытан в составе релаксметра ПМР- NP_2 (КГЭУ-2020). Для поиска резонансной области и частоты используется зонд, намотанный на трубу из ПВХ диаметром 18 мм. В качестве образца используется татарстанская тяжелая нефть, смешанная с бензином, что позволяет легко получать сигналы релаксации T_2 во время испытаний.

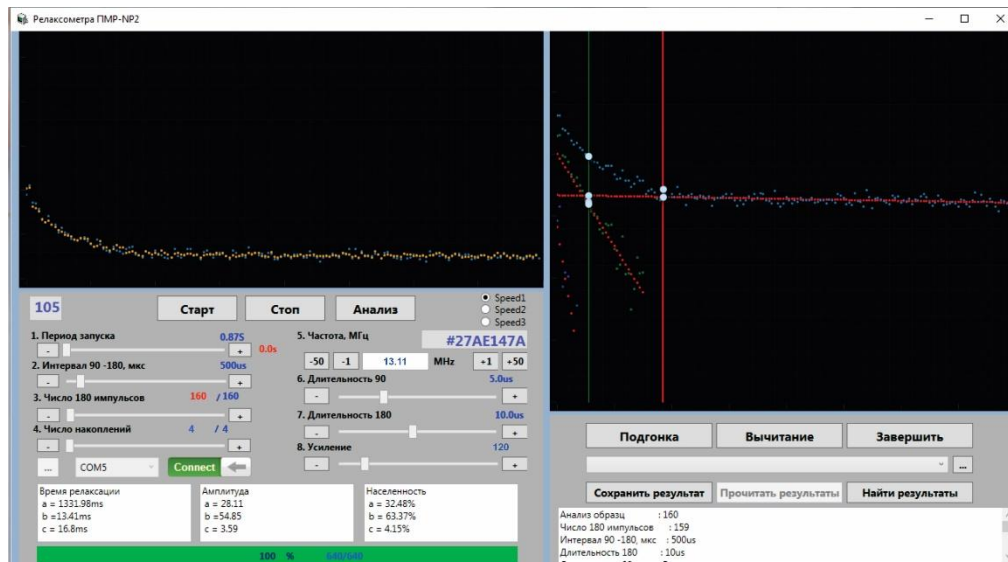


Рис. 8. Программный интерфейс управления релаксметром ПМР- NP_2 при испытании с прототипом МСХ

Fig. 8. PMR- NP_2 relaxometer control software interface when tested with the HMA prototype

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

Сначала зонд настраивается на резонанс с теоретически рассчитанной частотой $\nu_0 = 14.22 \text{ МГц}$. Однако сигнал огибающей спин-эхо (СЭ) при данной частоте получен не был. Затем релаксметр настраивался с постепенным уменьшением резонансной частоты до тех пор, пока не был определен сигнал огибающей СЭ для определения времен релаксации T_2 . После многочисленных регулировок резонансная частота релаксметра с разработанным магнитом на МСХ подтверждена на значении $\nu_0 = 13.11 \text{ МГц}$. Программный интерфейс управления релаксметром ПМР- NP_2 представлен на рисунке 8.

Заключение (Conclusions)

Данное исследование является частью работы по разработке усовершенствованного портативного ПМР-релаксметра для применения в онлайн-анализаторных комплексах для экспресс-контроля параметров скважинной жидкости и сырой нефти. Задачи, решаемые в ходе исследования:

- определение факторов, влияющих на качество магнитного поля МП МСХ, и методы оптимизации этих параметров;
- разработка МП МСХ с использованием 3-коаксиальной кольцевой структуры в одном слое МСХ. Прототип магнита имеет габариты 14×14×12 см, массу 4,5 кг с диаметром зазора 30 мм, что позволяет вставить в зазор трубку Ø30 мм для анализа проточной жидкости.
- способ улучшения однородности магнитного поля в зазоре МСХ за счет использования высокопроницаемых фольг из кремнистой стали, размещенных перпендикулярно магнитному полю, и использования прокладок между слоями МСХ. Плотность магнитного поля в зазоре МП МСХ достигает $B_0 = 0.334 \text{ Тл}$ с неоднородностью $\Delta B/B_0 = 2000 \text{ ppm}$ в области объемом $\approx 6 \text{ см}^3$ в центре зазора;
- разработан недорогой прибор для измерения магнитных полей на основе датчика Холла и платы Arduino. Прибор имеет диапазон измерения до 1.25 Тл при чувствительности

0.4 мВ/мТл. Прибор устойчив к помехам магнитного поля и не меняет чувствительность при изменении температуры в зоне измерения;

– испытания на протонном магнитном резонансе с МП МСХ показали, что прототип нормально работал с релаксометром ПМР- NP_2 на частоте $\nu_0 = 13.11$ МГц.

Литература

1. М. А. Юрчик, Н. В. Дукмасова. Цифровизация: новая эра для нефти и газа // Система управления экологической безопасностью: сборник трудов XIV международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 20-21 мая 2020 г.). — Екатеринбург: УрФУ, 2020 г. - С. 281-286.
2. Азиева Р.Х., Таймасханов Х.Э.. Необходимость И Возможности Использования Цифровых Технологий В Нефтегазовой Отрасли В Условиях Цифровой Трансформации Экономики.// Известия Санкт-Петербургского Государственного Экономического Университета. Номер: 5 (125) Год: 2020 С. 178-185.
3. Воробьев А.Е., Тчаро Х., Воробьев К.А. Цифровизация нефтяной промышленности: «интеллектуальный» нефтепромысел // Вестник Евразийской науки, 2018, №3. С. 71-87.
4. Сафиуллин Б.Р., Козелкова В.О., Кашаев Р.С., и др. Очистка нефти от асфальтено-смола и парафинов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 166-178.
5. Козелков Олег Владимирович. Методы и средства экспресс-контроля характеристик скважинной жидкости и нефти на базе протонной магнитной резонансной релаксометрии: Дис.докт. техн. наук. Казань; 2022.
6. Кашаев Р.С., Свинин А. Ю., Козелков О.В.. Минимизация ошибок эксперимента в методе ПМР и возможности получения спектра времен релаксации. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018, №11-12, т.20. с.152-160.
7. K. Halbach, "Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material," Nucl. Instrum. Methods. Feb. 1980, vol. 169, no. 1, pp. 1–10.
8. H. Raich and P. Blümler, "Design and construction of a dipolar Halbach array with a homogeneous field from identical bar magnets: NMR Mandhalas," Concepts Magn. Reson. Part B Magn. Reson. Eng., Oct. 2004, vol. 23B, no. 1, pp. 16–25.
9. Нгуен Дык Ань, Кашаев Р.С. Усовершенствование модели магнита хальбаха для релаксометра протонного магнитного резонанса/ VIII Национальной н/пр. конф. Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ. (Казань 8-9 декабря 2022г.). – Казань, 2022. – Т.1. – С.82-87.
10. Amir D. Arslanov, Rustem S. Kashaev, Oleg V. Kozelkov. System of Oil Express Flow Control on the Basis of Proton Magnetic Resonance Relaxometry. 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon 2024), 24-30 March 2024. Sochi, Russia . pp. 214-219.
11. G. Moresi, R. Magin. Miniature permanent magnet for table – top NMR. Concepts in Magnetic Resonance Part B Magnetic Resonance Engineering 19B (1). 2003. pp: 35-43. <https://doi.org/10.1002/cmr.b.10082>.
12. Soltner, H. and Blümler, P., Dipolar Halbach magnet stacks made from identically shaped permanent magnets for magnetic resonance. Concepts Magn. Reson., 36A(4), pp: 211-222, 2010 <https://doi.org/10.1002/cmr.a.20165>.
13. Bernhard Blümich, Ernesto Danieli, Federico Casanova, et al. Mobile sensor for high resolution NMR spectroscopy and imaging. Journal of Magnetic Resonance, Volume 198, Issue 1, 2009, Pages 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2009.01.022>.
14. Cooley, C.Z., Stockmann, J.P., Armstrong, B.D., et al. Two – dimensional imaging in a lightweight portable MRI scanner without gradient coils. Magn. Reson. Med. 73(2), Pages 872–883 (2015). <https://doi.org/10.1002/mrm.25147>.
15. A. Bogaychuk, V. Kuzmin; Accounting for material imperfections in the design and optimization of low cost Halbach magnets. Rev. Sci. Instrum. 1 October 2020; 91 (10): 103904. <https://doi.org/10.1063/5.0013274>.
16. Свинин А.Ю., Кашаев Р.С., Козелков О.В. Разработка магнитной системы датчика для ПМР-анализатора. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 4 С. 115-122. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-115-122.
17. O'Reilly, T., et al., In vivo 3D brain and extremity MRI at 50 mT using a permanent magnet Halbach array. Magnetic Resonance in Medicine, 2021. 85(1): p. 495-505.
18. C. Z. Cooley et al., "Design of Sparse Halbach Magnet Arrays for Portable MRI Using a Genetic Algorithm," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 1, pp. 1-12, Jan. 2018, Art no. 5100112, doi: 10.1109/TMAG.2017.2751001.

Авторы публикации

Нгуен Дык Ань – аспирант кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. *ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-8870-3855>. Email: navypro1991@gmail.com*

Кашаев Рустем Султанхамитович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. *ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8582-1577>. Email: kashaev2007@yandex.ru*

Козелков Олег Владимирович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. *ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6067-8719>. Email: ok.1972@list.ru*

References

1. M. A. Yurchik, N. V. Dukmasova. Tsifrovizatsiya: novaya era dlya nefi i gaza // Sistema upravleniya ekologicheskoi bezopasnost'yu: sbornik trudov XIV mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Ekaterinburg, 20-21 maya 2020 g.). — Ekaterinburg: UrFU, 2020 g. - pp. 281-286. (In Russ).
2. Azieva R.Kh., Taimaskhanov Kh.E.. Neobkhodimost' I Vozmozhnosti Ispol'zovaniya Tsifrovyykh Tekhnologii V Neftegazovoi Otrasi V Usloviyakh Tsifrovoy Transformatsii Ekonomiki.// Izvestiya Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Ekonomicheskogo Universiteta. Nomer: 5 (125) God: 2020 pp. 178-185.(In Russ).
3. Vorob'ev A.E., Tcharo Kh., Vorob'ev K.A. Tsifrovizatsiya neftyanoi promyshlennosti: «intellektual'nyi» neftepromysel // Vestnik Evraziiskoi nauki, 2018, №3. pp. 71-87.(In Russ).
4. Safiullin B.R., Kozelkova V.O., Kashaev R.S., i dr. Ochistka nefi ot asfal'teno-smol i parafinov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI. 2022. T.24. № 5. pp. 166-178.(In Russ).
5. Kozelkov Oleg Vladimirovich. Metody i sredstva ekspress-kontrolya kharakteristik skvazhinnoi zhidkosti i nefi na baze protonnoi magnitnoi rezonansnoi relaksometrii: Dis.dokt. tekhn. nauk. Kazan'; 2022.(In Russ).
6. Kashaev R.S., Svinin A. Yu., Kozelkov O.V.. Minimizatsiya oshibok eksperimenta v metode PMR i vozmozhnosti polucheniya spektra vremen relaksatsii. // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI. 2018, №11-12, t.20. pp.152-160.(In Russ).
7. K. Halbach, "Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material," Nucl. Instrum. Methods. Feb. 1980, vol. 169, no. 1, pp. 1–10.
8. H. Raich and P. Blümler, "Design and construction of a dipolar Halbach array with a homogeneous field from identical bar magnets: NMR Mandhalas," Concepts Magn. Reson. Part B Magn. Reson. Eng., Oct. 2004, vol. 23B, no. 1, pp. 16–25.
9. Nguen Dyk An', Kashaev R.S. Uovershenstvovannie modeli magnita khal'bakha dlya relaksometra protonnogo magnitnogo rezoansa/ VIII Natsional'noi n/pr. konf. Priporostroenie i avtomatizirovannyi elektroprivod v TEK i ZhKKh. (Kazan' 8-9 dekabrya 2022g.). – Kazan', 2022. – T.1. – pp.82-87.(In Russ).
10. Amir D. Arslanov, Rustem S. Kashaev, Oleg V. Kozelkov. System of Oil Express Flow Control on the Basis of Proton Magnetic Resonance Relaxometry. 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon 2024), 24-30 March 2024. Sochi, Russia . pp. 214-219.
11. G. Moresi, R. Magin. Miniature permanent magnet for table – top NMR. Concepts in Magnetic Resonance Part B Magnetic Resonance Engineering 19B (1). 2003. pp: 35-43. <https://doi.org/10.1002/cmr.b.10082>.
12. Soltner, H. and Blümler, P., Dipolar Halbach magnet stacks made from identically shaped permanent magnets for magnetic resonance. Concepts Magn. Reson., 36A(4), pp: 211-222, 2010 <https://doi.org/10.1002/cmr.a.20165>.
13. Bernhard Blümich, Ernesto Danieli, Federico Casanova, et al. Mobile sensor for high resolution NMR spectroscopy and imaging. Journal of Magnetic Resonance, Volume 198, Issue 1, 2009, Pages 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2009.01.022>.
14. Cooley, C.Z., Stockmann, J.P., Armstrong, B.D., et al. Two – dimensional imaging in a lightweight portable MRI scanner without gradient coils. Magn. Reson. Med. 73(2), Pages 872–883 (2015). <https://doi.org/10.1002/mrm.25147>.
15. A. Bogaychuk, V. Kuzmin; Accounting for material imperfections in the design and optimization of low cost Halbach magnets. Rev. Sci. Instrum. 1 October 2020; 91 (10): 103904. <https://doi.org/10.1063/5.0013274>.

16. Svinin A.Yu., Kashaev R.S., Kozelkov O.V. Razrabotka magnitnoi sistemy datchika dlya PMR-analizatora. // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI. 2020. T. 22. № 4 S. 115-122. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-115-122.(In Russ).

17. O'Reilly, T., et al., In vivo 3D brain and extremity MRI at 50 mT using a permanent magnet Halbach array. Magnetic Resonance in Medicine, 2021. 85(1): p. 495-505.

18. C. Z. Cooley et al., "Design of Sparse Halbach Magnet Arrays for Portable MRI Using a Genetic Algorithm," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 1, pp. 1-12, Jan. 2018, Art no. 5100112, doi: 10.1109/TMAG.2017.2751001.

Authors of the publication

Nguyen Duc Anh – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-8870-3855>. Email: navypro1991@gmail.com

Rustem S. Kashaev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8582-1577>. Email: kashaev2007@yandex.ru

Oleg B. Kozelkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6067-8719>. Email: ok.1972@list.ru

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

Получено 08.01.2025 г.

Отредактировано 31.01.2025 г.

Принято 25.02.2025 г.



ВАЛИДАЦИЯ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТОПЛИВ И МОТОРНЫХ МАСЕЛ

Шаталов К.В.¹, Зверева Э.Р.²

¹25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России, г. Москва, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

1499090@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Разработка методов контроля материалов, изделий, веществ и природной среды должна завершаться этапом валидации. Известен перечень валидационных характеристик и рекомендации по их оцениванию для методов контроля состава материалов, изделий, веществ и природной среды. Однако эти описания и рекомендации не могут быть в полной мере использованы в случае методов контроля свойств материалов, изделий, веществ и природной среды, в частности, эксплуатационных свойств топлив и моторных масел. ЦЕЛЬ. Разработка процедуры валидации методов контроля эксплуатационных свойств топлив и моторных масел и подтверждение возможности её практической реализации. МЕТОДЫ. Практическая проверка теоретических положений проводилась в ходе валидации метода контроля термоокислительной стабильности топлив для реактивных двигателей в динамических условиях. Сущность метода заключается в оценке количества отложений, образующихся при окислении топлива для реактивных двигателей в условиях его прокачки по кольцевому каналу вдоль нагреваемой оценочной трубки, размещённой внутри канала. Продукты окисления накапливаются в виде отложений на поверхности оценочной трубки, понижая её светоотражательную способность, и на контрольном фильтре, увеличивая перепад давления. Контроль термоокислительной стабильности проводится по показателям: индекс термостабильности, температура начала образования отложений, скорость перепада давления на фильтре. Метод реализуется на основе лабораторной установки ДТС-4. РЕЗУЛЬТАТЫ. Исходя из специфики процедуры и используемых средств контроля, предложен набор валидационных характеристик методов контроля эксплуатационных свойств топлив и моторных масел: прецизионность и точность метода контроля; пригодность средств контроля; диапазон значений контролируемых величин; чувствительность метода контроля к изменениям в составе топлива (масла); устойчивость (робастность) метода к небольшим изменениям параметров контроля; сравнение вновь разработанного метода с уже известными методами, имеющими сходное функциональное назначение; качество моделирования исследуемого химмотологического процесса. Для повышения эффективности работ по валидации целесообразно предусматривать дополнительный этап по разработке контрольного образца с постоянными, гарантировано воспроизводимыми значениями величин, характеризующими эксплуатационные свойства моторных топлив и масел (внутреннего стандарта метода контроля). ЗАКЛЮЧЕНИЕ Опыт работы по валидации метода ДТС-4 показывает, что разработанная процедура валидации методов контроля эксплуатационных свойств топлив и моторных масел обеспечивает получение достаточного количества объективных данных о том, что новый метод контроля позволяет получить достоверную информацию о заданном эксплуатационном свойстве исследуемого нефтепродукта.

Ключевые слова: валидация; метод контроля; эксплуатационные свойства; топлива; моторные масла; ДТС-4; термоокислительная стабильность в динамических условиях.

Для цитирования: Шаталов К.В., Зверева Э.Р. Валидация методов контроля эксплуатационных свойств топлив и моторных масел // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 33-48. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-33-48.

VALIDATION OF METHODS FOR CONTROLLING THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF FUELS AND MOTOR OILS

Shatalov K.V.¹, Zvereva E.R.²

¹25-th State Research Institute of Chemmotology, Ministry of Defence of the Russian Federation, Moscow, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
1499090@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The development of methods for controlling materials, products, substances and the natural environment should be completed by the validation stage. There is a well-known list of validation characteristics and recommendations for their evaluation for methods of controlling the composition of materials, products, substances and the natural environment. However, these descriptions and recommendations cannot be fully used in the case of methods for controlling the properties of materials, products, substances and the natural environment, in particular, the performance characteristics of fuels and motor oils. *THE PURPOSE.* Development of a procedure for validating methods for controlling the performance characteristics of fuels and motor oils and confirming the possibility of its practical implementation. *METHODS.* The practical verification of the theoretical provisions was carried out during the validation of the method for controlling the thermal and oxidative stability of jet engine fuels under dynamic conditions. The essence of the method is to estimate the amount of deposits formed during the oxidation of fuel for jet engines under conditions of its pumping through an annular channel along a heated evaluation tube located inside the channel. Oxidation products accumulate as deposits on the surface of the evaluation tube, reducing its reflectivity, and on the filter element of the control filter, increasing the pressure drop on the control filter. Thermal and oxidative stability is monitored according to the following indicators: thermal stability index, the temperature at which deposits form, and the rate of pressure drop across the filter. The method is implemented on the basis of the DTS-4 laboratory installation. *RESULTS.* Based on the specifics of the procedure and the controls used, a set of validation characteristics of methods for monitoring the operational properties of fuels and motor oils is proposed: precision and accuracy of the control method; suitability of controls; range of values of controlled quantities; sensitivity of the control method to changes in the composition of fuel (oil); robustness of the method to small changes in control parameters; comparison of the newly developed method with already known methods having a similar functional purpose; the quality of modeling of the studied chemmotological process. To increase the efficiency of validation work, it is advisable to provide an additional stage for the development of a control sample with constant, guaranteed reproducible values characterizing the performance properties of motor fuels and oils (the internal standard of the control method). *CONCLUSION.* The experience of validating the DTS-4 method shows that the developed procedure for validating methods for monitoring the performance characteristics of fuels and motor oils ensures that a sufficient amount of objective data is obtained that the new control method allows obtaining reliable information about a given operational property of the studied petroleum product.

Keywords: Validation; Control method; Performance characteristic of petroleum product; fuels; engine oils; DTS-4; thermal and oxidative stability under dynamic conditions.

For citation: Shatalov K.V., Zvereva E.R. Validation of methods for controlling the performance characteristics of fuels and motor oils. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (2): 33-48. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-33-48.

Введение (Introduction)

В современной практике работы испытательных лабораторий обязательным является подтверждение пригодности¹ используемых методов контроля поставленной цели их применения [1]. Общепринятой процедурой подтверждения пригодности методов контроля материалов, изделий, веществ и природной среды является валидация. Валидация

¹ ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – М.: Стандартинформ, 2021 – 32 с.

используемых методов контроля является актуальной для различных областей деятельности [2-5].

В общем виде рекомендации по валидации методов контроля представлены в Руководстве Европейской организации по аналитической химии EURACHEM [6]. Особенности областей применения и многообразие объектов контроля обуславливают необходимость адаптации положений ГОСТ ISO/IEC 17025¹ и Руководства [6] к конкретным сферам использования методов контроля. Например, известны документы^{2,3} устанавливающие требования к валидации методов контроля лекарственных средств и медицинских иммунобиологических препаратов.

Специфика контроля эксплуатационных свойств топлив и моторных масел диктует необходимость обоснования порядка проведения валидации используемых методов контроля, перечня валидационных характеристик и порядка их определения. При этом под эксплуатационными свойствами топлив и моторных масел понимаются свойства, характеризующие полезный эффект от использования топлив (масел) и проявляющиеся при их применении в двигателях. Например, прокачиваемость, испаряемость, воспламеняемость, горючесть, склонность к образованию отложений, совместимость с конструкционными материалами. А для их контроля используются уникальные лабораторные и моторные стенды, моделирующие условия работы топлив (масел) в двигателях и обеспечивающие такое направление и глубину взаимосвязанных и упорядоченных по времени физико-химических процессов превращения топлив (масел), которое характерно для реальных объектов техники.

Целью данной статьи является краткое изложение теоретических положений по валидации методов контроля эксплуатационных свойств топлив и моторных масел и подтверждение возможности их практической реализации на примере валидации метода контроля термоокислительной стабильности топлив для реактивных двигателей в динамических условиях.

Литературный обзор (Literature Review)

В общем случае под валидацией понимается процедура подтверждения пригодности метода контроля для достижения поставленных целей, включающая исследование и предоставление объективных доказательств того, что конкретные требования к специфическому целевому использованию метода выполняются [7].

Валидацию метода контроля эксплуатационных свойств топлив (масел) можно интерпретировать как процесс подтверждения того, что данный метод позволяет получить достоверную информацию о заданном эксплуатационном свойстве исследуемого нефтепродукта. Фактически валидация – это проверка того можно или нет с помощью данного метода оценить характеристику требуемого эксплуатационного свойства и получить при этом точный и достоверный результат.

Рекомендуется проводить валидацию методов контроля в следующих случаях [8, 9]:

- разработки нового метода;
- пересмотра либо модернизации общепризнанного метода;
- для демонстрации эквивалентности двух методов, например, нового и стандартного.

Перечень характеристик, контролируемых в ходе валидации и объем работ, необходимых для установления этих характеристик (далее – степень валидации) зависит от уровня новизны метода контроля. Для вновь разработанного метода необходимо проводить валидацию в полном объеме. Для пересматриваемых или модернизированных методов требуемая степень валидации будет зависеть от характера внесенных изменений. Общее правило таково – чем существеннее внесенные изменения, тем шире должен быть перечень характеристик и объем валидационных работ.

Перечень контролируемых характеристик и объем работ, как правило, оформляют в виде программы валидации. По результатам выполненных работ составляется отчет, который должен содержать подробные ответы на задачи, поставленные в программе и вывод о том, насколько эффективно валидированный метод позволяет оценивать эксплуатационные свойства топлив (масел). Ознакомление заинтересованных организаций

² Методические указания МУ 3.3.2.1886-04. Валидация методов контроля химических и физико-химических показателей качества медицинских иммунобиологических препаратов: организация, порядок проведения и представление результатов: – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 39 с.

³ Валидация аналитических методик: Общая фармакопейная статья ОФС 1.1.0012.15. – М.: Минздрав России, - 13 с.

и лиц с полным и подробным отчетом о валидации позволит повысить доверие к новому методу и убедить коллег в его эффективности [7].

Сущность валидации заключается в том, что проводится экспериментальная оценка показателей точности метода контроля, а также ряда характеристик, которые принято называть валидационными.

Известен перечень валидационных характеристик и рекомендации по их оцениванию для методов контроля состава материалов, изделий, веществ и природной среды, например, работы [6, 8, 9]. Однако эти описания и рекомендации не могут быть в полной мере использованы в случае методов контроля *свойств* материалов, изделий, веществ и природной среды, в частности эксплуатационных свойств топлив и моторных масел.

Теоретические положения

На основе обобщения рекомендаций, изложенных в работах [6-9], специфики процедуры и используемых средств контроля предлагается следующий набор валидационных характеристик для методов контроля эксплуатационных свойств топлив и моторных масел:

- прецизионность и точность метода контроля;
- пригодность средств контроля (испытательного оборудования);
- диапазон значений контролируемых величин;
- чувствительность метода контроля к изменениям в составе топлива (масла);
- устойчивость (робастность) метода к небольшим изменениям параметров контроля;
- сравнение вновь разработанного метода с уже известными методами, имеющими сходное функциональное назначение;
- качество моделирования исследуемого химмотологического процесса⁴.

Для повышения эффективности работ по валидации методов контроля эксплуатационных свойств топлив и моторных масел целесообразно предусматривать дополнительный этап по разработке внутреннего стандарта метода контроля эксплуатационных свойств топлив (масел), который необходим для проверки и настройки испытательного оборудования, установления характеристик систематической погрешности метода контроля эксплуатационных свойств топлив (масел), а также для и сравнения характеристик систематической погрешности нового и известного методов контроля. Под внутренним стандартом понимается контрольный образец с постоянными, гарантировано воспроизводимыми значениями величин, характеризующими эксплуатационные свойства моторных топлив (масел).

Известно, что величина, характеризующая эксплуатационные свойства топлива, по тому или иному методу контроля, имеет постоянное значение для индивидуального химического соединения (углеводорода). Неизменность характеристик, описывающих эксплуатационные свойства топлив, для индивидуальных химических соединений позволяет создавать на их базе (или на основе их смесей) контрольные образцы с постоянными, неизменными характеристиками. Например, в методе контроля склонности дизельных топлив к нагарообразованию в качестве внутреннего стандарта используется смесь декагидронафталина (декалина) и н-гексадекана (цетана) в объемном соотношении 4:1. Для обеспечения подобия между химическим составами моторного топлива и внутреннего стандарта, его разработку целесообразно проводить на основе математических моделей вида «состав смеси индивидуальных углеводородов – характеристика эксплуатационного свойства».

На основе практики работ по созданию и применению «эталонных» масел [10] предлагается использовать в качестве внутреннего стандарта метода контроля эксплуатационных свойств моторных масел смесь базового масла (10-го класса вязкости по ГОСТ 17479.1⁵ или SAE 30 по API) с присадками, обеспечивающими требуемый уровень исследуемого эксплуатационного свойства.

Показатели прецизионности и точности методов контроля эксплуатационных свойств топлив и моторных масел устанавливаются в ходе внутрिलाбораторного эксперимента. Подробно порядок проведения эксперимента и обработки его результатов рассмотрен в работах [11, 12].

При проверке пригодности средств контроля (испытательного оборудования) определяют возможность воспроизведения условий испытания, заданных методом. В этой

⁴ Химмотологический процесс – совокупность взаимосвязанных и упорядоченных по времени физико-химических процессов превращения топлива (масла), протекающих в двигателе под воздействием внутренних и внешних факторов.

⁵ ГОСТ 17149.1-2015 Масла моторные. Классификация и обозначение. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.

части выполняемая работа идентична процедуре аттестации испытательного оборудования. Кроме того, проверяют возможность средств контроля поддерживать в пределах допустимых значений заданные параметры испытания (например, температуру, скорость потока и т.п.) в течение длительного периода времени минимум в 2-3 раза превышающего продолжительность испытания, указанную в методе.

Диапазон значений контролируемых величин (наибольшее и наименьшее значения) зависит от углеводородного и компонентного состава топлив (масел). Для его установления необходимо провести исследования производимых в настоящее время товарных топлив (масел) с использованием метода, подвергнутого валидации. При этом следует учитывать всё многообразие технологий производства и возможные вариации компонентного состава топлив (масел). Увеличение глубины переработки нефти, появление новых технологий производства топлив (масел) могут существенно повлиять на диапазон значений контролируемых величин.

Методы контроля эксплуатационных свойств должны быть чувствительны к изменению углеводородного и компонентного состава топлив (масел). Для хорошо разработанного метода небольшое изменение концентрации влияющего вещества (компонента) должно вызывать адекватное изменение наблюдаемого аналитического сигнала и контролируемой характеристики эксплуатационных свойств. Например, концентрации прямогонной керосиновой фракции в топливе для реактивных двигателей на температуру начала образования отложений (характеристики склонности к образованию отложений топлив для реактивных двигателей). Исследование чувствительности метода контроля, как правило, приводит к получению новых научных знаний - функциональной зависимости между значением контролируемой характеристики и содержанием влияющего вещества (компонента).

Методы контроля эксплуатационных свойств топлив (масел) должны быть устойчивы к небольшим изменениям параметров испытания, например, объема пробы, температуры, скорости нагрева, давления и т.п. Исследование устойчивости (робастности) метода контроля проводится с целью определения, какое отклонение в значениях параметров испытания приведет к появлению сверхнормативной погрешности, что позволит уточнить требования, либо к стабильности поддержания заданных параметров, либо к показателям точности метода контроля.

Критериями сравнения нового и известного метода контроля, имеющими сходное функциональное назначение, являются:

- достижение цели разработки нового метода (снижение времени, стоимости испытания, расширение диапазона значений контролируемых величин и т.п.);
- отношение дисперсий повторяемости;
- стандартизированная разность средних значений.

Отношение дисперсий повторяемости характеризует случайную ошибку (прецизионность) нового метода контроля. Если отношение дисперсии повторяемости нового метода (метод В) к дисперсии повторяемости известного метода (метод А) будет меньше или равно отношению квантиля χ^2 -распределения при вероятности p и числе степеней свободы $f_{rB} = (n_B - 1)$ к числу степеней свободы f_{rA} , то нет оснований считать, что прецизионность (случайная погрешность) нового метода хуже известного:

$$\frac{S_{rB}^2}{S_{rA}^2} \leq \frac{\chi_p^2(f_{rB})}{f_{rB}}, \quad (1)$$

где S_{rA}^2 – дисперсия повторяемости известного метода (метода А); S_{rB}^2 – дисперсия повторяемости нового метода (метода В); $\chi_p^2(f_{rB})$ – квантиль χ^2 -распределения при числе степеней свободы f_{rB} ; p – уровень значимости, равный 0,05; n – количество параллельных определений, предусмотренных методом контроля.

Для наиболее распространенного случая, когда методом предусмотрено проведение двух параллельных определений ($n = 2$; $f_{rB} = 1$; $\chi_p^2(f_{rB}) = 3,841$) формула (1) имеет вид:

$$\frac{S_{rB}^2}{S_{rA}^2} \leq 3,841. \quad (2)$$

Стандартизированная разность средних значений характеризует систематическую ошибку (правильность) нового метода контроля. Для этого с помощью нового метода (метод В) и известного метода (метод А) проводят не менее четырех испытаний одного и того же образца топлива (масла). Разность между средними значениями $\bar{X}_A$ и $\bar{X}_B$ для методов А и В не является статистически значимой, если она не превышает удвоенного среднеквадратического значения $S = \sqrt{S_A^2 + S_B^2}$ выборочных стандартных отклонений средних значений для этих методов:

$$|\bar{X}_A - \bar{X}_B| \leq 2S \text{ или } \left| \frac{\bar{X}_A - \bar{X}_B}{S} \right| \leq 2, \quad (3)$$

где $S = \sqrt{S_A^2 + S_B^2}$ рассчитывается по формуле (4); $N \geq 5$ – количество выполненных испытаний.

$$S = \sqrt{S_A^2 + S_B^2} = \sqrt{\frac{S_{RA}^2 - 0,5 \cdot S_{rA}^2}{N} + \frac{S_{RB}^2 - 0,5 \cdot S_{rB}^2}{N}}, \quad (4)$$

Определение показателей точности метода контроля эксплуатационных свойств топлив (масел) позволяет оценить качество моделирования химмотологического процесса, разработки испытательного оборудования. Если при разработке средств и метода контроля обеспечено точное регулирование или постоянство большинства влияющих факторов (высокое качество моделирования), то:

– систематическая погрешность метода контроля будет статистически незначимой величиной, то есть будет выполняться условие:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_R} \leq \frac{1}{3}, \quad (5)$$

где σ_c – стандартное отклонение систематической погрешности; σ_R – стандартное отклонение воспроизводимости;

– случайная погрешность метода контроля не будет превышать 1/3 нижней границы диапазона контроля LD :

$$\sigma_R \leq \frac{LD}{3}. \quad (6)$$

Если при разработке средств и метода контроля обеспечено точное регулирование или постоянство основных влияющих факторов (удовлетворительное качество моделирования), то:

– систематическая погрешность метода контроля будет статистически незначимой величиной;

– случайная погрешность метода контроля не будет превышать нижней границы диапазона контроля LD :

$$\sigma_R < LD. \quad (7)$$

Если же условия (5) и (7) не выполняются, то качество разработки средств и метода контроля (моделирования химмотологического процесса) следует признать неудовлетворительным, необходимо провести поиск и устранение причин появления сверхнормативной погрешности.

Высокое и удовлетворительное качество моделирования химмотологического процесса свидетельствует о том, что новый метод контроля позволяет получать данные об эксплуатационных свойствах топлив (масел) адекватные реальным условиям применения исследуемых нефтепродуктов в двигателях.

Рассмотрим процедуру валидации методов контроля эксплуатационных свойств топлив и моторных масел на примере метода контроля термоокислительной стабильности топлив для реактивных двигателей в динамических условиях на установке ДТС-4 (далее метод ДТС-4).

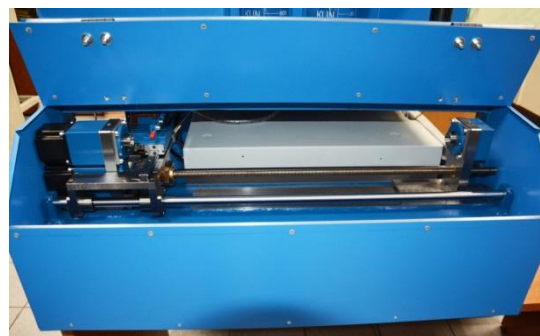
Методы (Methods)

Испытания проводятся на лабораторной установке ДТС-4 (рис. 1), которая состоит из гидравлического блока, устройства регистрации отложений и блока управления на базе панельного компьютера, размещенных в одном корпусе. Подробное описание лабораторной установки ДТС-4 приведено в работах [13, 14], её технические характеристики в таблице 1.

На базе лабораторной установки ДТС-4 разработан новый метод контроля термоокислительной стабильности топлив для реактивных двигателей в динамических условиях. Сущность метода заключается в оценке количества отложений, образующихся при окислении топлива для реактивных двигателей в условиях его прокачки по кольцевому каналу вдоль нагреваемой оценочной трубки, размещённой внутри канала, и через контрольный фильтр, а также температуры начала их образования. Продукты окисления накапливаются в виде отложений на поверхности оценочной трубки, понижая её светоотражательную способность, и на фильтроэлементе контрольного фильтра, увеличивая перепад давления на контрольном фильтре.



а) общий вид установки



б) устройство регистрации отложений

Рис. 1. Лабораторная установка ДТС-4: а) общий вид установки; б) устройство регистрации отложений

Fig. 1. DTS-4 laboratory installation: a) general view of the installation; b) sediment recording device

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

Таблица 1

Table 1

Технические характеристики установок ДТС
Technical characteristics of DTS installations

Наименование показателя	Значения показателя
Напряжение питания, В	220±20
Мощность, не более, Вт	1500
Габаритные размеры, мм: высота х ширина х глубина	700x800x700
Масса установки, кг	85
Диапазон изменения объемной скорости прокачки топлива по топливному контуру, см ³ /мин	(1 – 10) ±0,1
Максимальное давление топлива в топливном контуре, МПа	4±0,1
Максимальная температура рабочей поверхности оценочной трубки, °С	450
Температура топлива на входе в реактор, °С	230
Максимальный перепад давления на контрольном фильтре, кПа	100
Продолжительность испытания, ч	2,6
Объем топлива для одного испытания, дм ³	0,35

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

Испытания проводят следующим образом. Готовят к испытаниям оценочную трубку (удаляют отложения с помощью алмазной пасты и полируют до зеркального блеска) и проводят исходное сканирование трубки в устройстве регистрации отложений. Затем собирают и устанавливают контрольный блок, контрольный фильтр, заливают испытуемое топливо и проводят подготовку установки ДТС-4 к испытаниям. Включают топливный насос, проводят проверку герметичности установки, значений расхода топлива. Включают нагрев оценочной трубки. При достижении температуры стенки оценочной трубки значения $(270 \pm 1)^\circ\text{C}$ включают секундомер. Момент включения секундомера принимают за начало испытания. Во время испытания каждые 30 минут регистрируют перепад давления на контрольном фильтре и повторяют проверку расхода топлива. В случае увеличения перепада давления на контрольном фильтре до 100 кПа по истечении времени испытания, контролируют открытие байпасного клапана. Записывают время включения байпасного клапана.

Через 160 мин выключают нагрев оценочной трубки. Работу топливного насоса прекращают после уменьшения максимальной температуры стенки оценочной трубки до значения 45°C . После охлаждения контрольного блока проводят его демонтаж и разборку. Помещают оценочную трубку на 10 минут в контейнер с гептаном, извлекают ее, сушат на воздухе в течение 10 минут между листами фильтровальной бумаги. Сухую оценочную трубку помещают в устройство регистрации отложений и снимают диаграмму сканирования.

Контроль термоокислительной стабильности проводится по показателям:

- индекс термостабильности, ИТ (характеризует количество нерастворимых осадков, образующих отложения (оседающих) на элементах топливной системы);
- температура начала образования отложений, $T_{но}$ (характеризует максимальную температуру нагрева топлива, при которой начинается образование нерастворимых осадков);
- скорость перепада давления на фильтре, W_{ϕ} , кПа/мин (характеризует количество нерастворимых осадков, находящихся во взвешенном состоянии в топливе).

Скорость перепада давления W_{ϕ} вычисляют как отношение перепада давления ΔP наблюдаемого на контрольном фильтре к полному времени проведения испытания $\tau = 160$ мин или времени (τ , мин), необходимому для достижения максимального перепада давления $\Delta P = 100$ кПа:

$$W_{\phi} = \frac{\Delta P}{\tau}, \text{ кПа/мин.} \quad (8)$$

Индекс термостабильности и температуру начала образования отложений рассчитывают путем компьютерной обработки диаграмм сканирования оценочной трубки до и после испытания с помощью программы АУСЧ ДТС-4 [15].

Результаты (Results)

При проверке пригодности средств контроля определяли возможность установки ДТС-4 поддерживать в пределах допустимых значений заданные параметры испытания в течение периода времени в 3 раза превышающего установленную продолжительность испытания - 160 мин. Установлено, что установка ДТС-4 обеспечивает автоматическое поддержание заданных параметров испытания в течении 480 минут в допустимом интервале значений (табл. 2). На основании чего, был сделан вывод о соответствии установки ДТС-4 требованиям разрабатываемого метода.

Для установления диапазона значений контролируемых величин было проведено исследование 32 образцов топлив ТС-1, РТ, Т-6 и Т-8В различного компонентного и химического состава (табл. 3).

Таблица 2

Table 2

Сведения о стабильности поддержания на установке ДТС-4 заданных параметров испытания

Information on the stability of maintaining the set test parameters on the DTS-4 installation

Параметры испытания	Допустимый интервал значений	Продолжительность работы установки ДТС-4, мин							
		60	120	180	240	300	360	420	480
Температура стенки оценочной трубки, °С	269 – 271	270,5	270,0	269,8	270,5	270,3	269,7	270,2	270,1
Давление топлива, МПа	3,2 – 3,8	3,54	3,56	3,53	3,51	3,49	3,52	3,58	3,57
Расход топлива, см ³ /мин	1,4 – 1,6	1,52	1,53	1,52	1,50	1,49	1,50	1,54	1,53

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

Таблица 3

Table 3

Результаты испытаний по методу ДТС-4 образцов топлив с различным компонентным составом

Test results using the DTS-4 method for fuel samples with different component compositions

Компонентный состав топлива, % масс.			Массовая доля, %		Результаты испытания	
прямогонная фракция	гидроочищенная фракция	гидрокрекингговая фракция	серы	меркаптановой серы	$T_{но}$, °С	ИТ, ед.
100			0,0340	0,0007	126	1,18
100			0,0320	0,0006	131	1,27
63,2		36,8	0,1000	0,0019	132	0,98
100			0,0520	0,0015	134	1,4
100			0,0150	0,0013	142	1,16
	63	37	0,0100	0,0019	144	1,28
35	65		0,0150	0,0014	145	1,05
100			0,0300	0,001	145	1,05
100			0,0260	0,0009	147	1,29
5	95		0,0840	0,0021	149	0,82
90		10	0,0240	0,0026	150	1,35

5,3		94,7	0,0062	0,0008	151	0,59
100			0,0420	0,0018	153	0,99
5	95		0,1600	0,0021	162	0,77
5	95		0,0650	0,0017	165	1,17
12,3	87,7		0,0067	0,0008	165	0,71
34	66		0,0480	0,0008	168	0,85
	100		0,0030	0,0003	184	0,52
	100		0,0110	0,0003	184	0,78
	100		0,0010	0,0003	186	0,81
	100		0,0500	0,00025	186	0,55
		100	0,0008	0	191	0,51
	100		0,0480	0,0008	193	0,55
	100		0,0009	0	196	0,75
	100		0,0015	0,0003	201	0,4
	100		0,0020	0	201	0,48
	100		0,0030	0,002	205	0,84
	100		0,0080	0,0003	206	0,6
	100		0,0030	0	212	0,29
		100	0,0050	0	216	0,32
		100	0,0100	0	217	0,26
		100	0,0050	0	228	0,39

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

Из таблицы 3 следует, что для контролируемых величин можно выделить два базовых диапазона значений:

- для прямогонных и смесевых топлив для реактивных двигателей:
 - температура начала образования отложений от 126 до 170 °С;
 - индекс термостабильности от 0,59 до 1,4 усл. ед.;
- для гидрооблагороженных топлив для реактивных двигателей:
 - температура начала образования отложений от 180 до 228 °С;
 - индекс термостабильности от 0,26 до 0,84 усл. ед.

Установлено, что значения контролируемых показателей метода ДТС-4: температуры начала образования отложений и индекса термостабильности, в неявном виде зависят от химического и компонентного состава топлива – чем выше массовая доля общей и меркаптановой серы и прямогонной керосиновой фракции, тем ниже значения температуры начала образования отложений и выше индекс термостабильности (табл. 3). Аналогичный характер влияния компонентного и химического состава топлив отмечался ранее при исследовании термоокислительной стабильности топлив для реактивных двигателей на установках ДТС-2 [16].

Полученные результаты свидетельствуют об удовлетворительной ранжирующей способности метода ДТС-4, он позволяет выявлять образцы топлив с высокой (для сверхзвуковой авиации) и низкой (для дозвуковой авиации) термостабильностью.

Для обеспечения возможности реализации базовых процедур по обеспечению точности испытаний (настройки и регулировки испытательного оборудования, контроля за стабильностью работы оператора, установлению характеристик систематической погрешности) были выполнены исследования по разработке внутреннего стандарта метода ДТС-4 - контрольных образцов с постоянными, гарантировано воспроизводимыми значениями контролируемых величин. С учетом того, что метод ДТС-4 предназначен для контроля топлив для реактивных двигателей с двумя уровнями термоокислительной стабильности, было принято решение о разработке двух типов внутренних стандартов: ТОС ТРД 1, который должен воспроизводить уровень термоокислительной стабильности топлива ТС-1, и ТОС ТРД 2 – топлива марки РТ (табл. 4).

Для обоснования состава внутренних стандартов ТОС ТРД 1 и ТОС ТРД 2 была исследована термоокислительная стабильность индивидуальных углеводородов различных классов (ундекана, додекана, цетана, 1-децена, декалина, 1-метилнафталина), а также их смесей с сернистыми соединениями (1-гептантиолом, дибутилсульфидом). Установлено, что получение образцов, соответствующих требованиям таблицы 4, обеспечивают смеси следующего состава: ТОС ТРД 1 - 85% додекана + 14,95% ундекана и 0,05% 1-гептантиола, ТОС ТРД 2 – 85% масс. додекана и 15% масс. ундекана.

Таблица 4
Table 4

Требования к допустимому диапазону значений внутреннего стандарта метода ДТС-4
Requirements for the permissible range of values of the internal standard of the DTS-4 method

Показатель, единицы измерения	Допустимый диапазон значений	
	ТОС ТРД 1	ТОС ТРД 2
Индекс термостабильности, ед.	от 0,9 до 2,0	от 0,2 до 0,9
Температура начала образования отложений, °С	от 100 до 170	от 180 до 220

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

Валидированные значения внутренних стандартов серии ТОС ТРД (табл. 5) были установлены экспериментально по методике, приведенной в работе [11].

Таблица 5
Table 5

Валидированные значения внутреннего стандарта метода ДТС-4
Validated values of the internal standard of the DTS-4 method

Показатель, единицы измерения	Валидированное значение	
	ТОС ТРД 1	ТОС ТРД 2
Индекс термостабильности, ед.	1,9	0,5
Температура начала образования отложений, °С	132,7	212,8

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

С использованием внутренних стандартов серии ТОС ТРД и образцов товарных топлив был проведен эксперимент по установлению показателей прецизионности и точности метода ДТС-4. Эксперимент проводился в условиях внутрилабораторной прецизионности – привлекалось два оператора, использовался один экземпляр установки ДТС-4. Процедура эксперимента и обработки полученных результатов изложена в работах [11, 12]. Показатели точности методики ДТС-4 представлены в таблице 6. На основании проведенных исследований проведена аттестация метода ДТС-4, получено свидетельство об аттестации методики измерений № 01.00257-2013/14906-2019 от 26 ноября 2019 г., которая зарегистрирована в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений под номером ФР.1.31.2020.36086.

Исследование устойчивости (робастности) метода ДТС-4 заключалось в экспериментальной проверке выполнения условия⁶ (7) при проведении испытаний с отклонениями от значений указанных в таблице 2 на $\pm 5\%$ и $\pm 10\%$.

$$|\bar{X} - A| \leq \frac{1}{\sqrt{1,96}} \sqrt{(2,77\sigma_R)^2 - 0,5(2,77\sigma_r)^2}, \quad (9)$$

где $\bar{X}$ – результат испытания внутреннего стандарта; A – валидированное значение внутреннего стандарта; σ_R , σ_r – соответственно стандартное отклонение внутрилабораторной прецизионности и сходимости метода ДТС-4.

Таблица 6
Table 6

Показатели прецизионности и точности методики ДТС-4
Indicators of precision and accuracy of the DTS-4 methodology

Стандартное отклонение	Показатели, единицы измерения		
	Температура начала образования отложений, $T_{но}$, °С	Индекс термостабильности, ИТ, ед.	Скорость перепада давления, W , Па/мин
абсолютной погрешности	$0,0396T_{но} - 1,0026$	$0,1043ИТ + 0,1501$	$4 \cdot 10^{-5}W^2 + 0,145W + 1,06$
неисключенной систематической погрешности	$0,00675T_{но} - 0,4246$	$0,0139ИТ + 0,00258$	$0,0215W + 0,1333$
внутрилабораторной прецизионности	$0,0202T_{но} - 0,5115$	$0,0532ИТ + 0,0766$	$2 \cdot 10^{-5}W^2 + 0,074W + 0,54$
повторяемости	$0,0147T_{но} - 0,1094$	$0,0422ИТ + 0,0649$	$3 \cdot 10^{-5}W^2 + 0,049W + 0,45$

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

⁶ отклонение результата испытания внутреннего стандарта от его валидированного значения не должно превышать допустимое значение критической разности

Испытания проводили в условиях повторяемости с использованием внутренних стандартов ТОС ТРД 1 и ТОС ТРД 2. Каждый внутренний стандарт подвергался испытаниям в условиях соответствующих одновременному и однонаправленному изменению параметров испытаний. Установлено, что отклонения параметров испытаний сверхдопустимого на 5% не приводят к появлению сверхнормативной погрешности. Отклонения параметров на 10% являются недопустимыми, условие (9) не соблюдается (табл. 7).

Таблица 7

Table 7

Сведения об устойчивости метода ДТС-4 к отклонению от заданных параметров испытания

Information on the stability of the DTS-4 method to deviation from the specified test parameters

Параметры испытания	Исходные условия испытания	Изменения условий испытания			
		+5%	-5%	+10%	-10%
Температура стенки оценочной трубки, °C	270	285	256	298	242
Давление топлива, МПа	3,5	4,0	3,0	4,2	2,9
Расход топлива, см ³ /мин	1,5	1,7	1,3	1,8	1,3
Результат испытания					
ТОС ТРД 1:					
Температура начала образования отложений, °C					
наблюдаемая разность $ \bar{X} - A $	1,2	2,0	2,9	6,8	5,4
допустимое значение критической разности	3,4				
Индекс термостабильности, ед.					
наблюдаемая разность $ \bar{X} - A $	0,12	0,22	0,27	0,63	0,71
допустимое значение критической разности	0,29				
ТОС ТРД 2:					
Температура начала образования отложений, °C					
наблюдаемая разность $ \bar{X} - A $	3,8	4,2	5,7	10,4	9,8
допустимое значение критической разности	6,2				
Индекс термостабильности, ед.					
наблюдаемая разность $ \bar{X} - A $	0,09	0,13	0,15	0,64	0,42
допустимое значение критической разности	0,16				

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

Сравнение известного метода контроля термоокислительной стабильности топлив для реактивных двигателей в динамических условиях на установке ДТС-2 по ГОСТ РВ 9130-004-2019⁷ и вновь разработанного метода ДТС-4 показывает его преимущество по целому ряду позиций:

- условий испытания приближены к условиям, наблюдаемым в современных теплонепряженных авиационных газотурбинных двигателях, за счет повышения максимальной температуры рабочей поверхности оценочной трубки более чем в 2 раза – с 210 °C до 450 °C;

- за счет уменьшения габаритов реактора в 25 раз сократился объем топлива, необходимого для проведения испытания – с 9,0 дм³ до 0,35 дм³;

- за счет повышения давления в системе до 3,5 МПа сокращена продолжительность испытания в 2 раза – с 300 до 160 минут;

- за счет использования двух встроенных компьютеров и специально разработанного программного обеспечения автоматизирована процедура проведения испытания.

Результаты испытаний, получаемые на установке ДТС-4, хорошо прослеживаются к результатам, получаемым на установке ДТС-2 (рис. 2 и 3), корреляция между ними выражается зависимостями:

- по показателю «температура начала образования отложений»:

$$T_{\text{ноДТС-4}} = 9,1787 \cdot T_{\text{ноДТС-2}}^{0,6079}; \quad (10)$$

- по показателю «индекс термостабильности»:

$$ИТ_{\text{ДТС-4}} = 0,355 \cdot ИТ_{\text{ДТС-2}} + 0,1729. \quad (11)$$

⁷ ГОСТ РВ 9130-004-2019 Топлива для реактивных двигателей. Метод определения термоокислительной стабильности в динамических условиях. М.: Стандартинформ, 2020. 19 с.

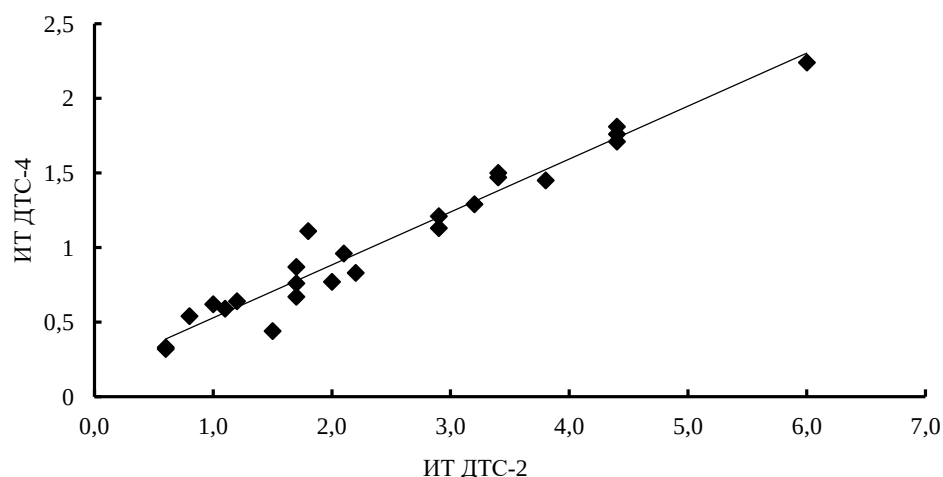


Рис. 2. Зависимость между значениями индекса термостабильности, определяемыми на установках ДТС-2 и ДТС-4, коэффициент корреляции 0,977

Fig. 2. The relationship between the values of the thermal stability index determined at the DTS-2 and DTS-4 installations, the correlation coefficient is 0.977

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

Значения средней скорости увеличения перепада давления на контрольном фильтре при испытаниях на ДТС-2 и ДТС-4 совпадают.

Сравнение характеристик повторяемости методов ДТС-4 и ДТС-2 проводили по критерию (1). Установлено, что для всего диапазона значений оцениваемых показателей отношение дисперсий повторяемости методик ДТС-4 и ДТС-2 меньше отношения квантиля χ^2 -распределения при вероятности $p = 0,05$ и числе степеней свободы $f_{TB} = 1$ к числу степеней свободы $f_{TB} = 1$ (табл. 8). Условие (1) выполнено, следовательно, прецизионность нового метода ДТС-4 находится на уровне прецизионности известной методики ДТС-2.

Правильность метода ДТС-4 (наличие систематической погрешности в получаемых результатах) оценивали путем сопоставления представительного множества результатов испытаний внутренних стандартов ТОС ТРД 1 и ТОС ТРД 2. Расчеты проводили по модифицированному критерию (2).

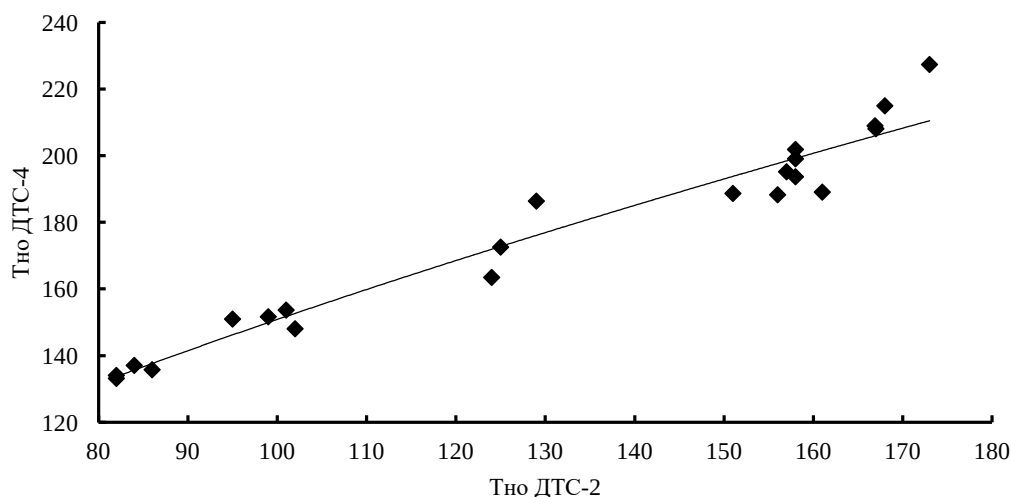


Рис. 3. Зависимость между значениями температуры начала образования отложений, определяемыми на установках ДТС-2 и ДТС-4, коэффициент корреляции 0,980

Fig. 3. The relationship between the temperature values of the beginning of sediment formation, determined at the DTS-2 and DTS-4 installations, the correlation coefficient is 0.980

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

Таблица 8
Table 8Сравнение характеристик повторяемости методов ДТС-4 и ДТС-2
Comparison of the repeatability characteristics of DTS-4 and DTS-2 methods

	Температура начала образования отложений, °С	Индекс термостабильности, ед.	Скорость перепада давления, Па/мин
Дисперсия повторяемости ДТС-4, $\sigma_{\text{ДТС-4}}^2$			
min	2,74	0,0054	0,249
max	12,71	0,0223	93,065
Дисперсия повторяемости ДТС-2, $\sigma_{\text{ДТС-2}}^2$			
min	6,30	0,0067	3,459
max	9,99	0,0100	27,457
Отношение $\sigma_{\text{ДТС-4}}^2 / \sigma_{\text{ДТС-2}}^2$			
min	0,435	0,800	0,072
max	1,273	2,229	3,389
Квантиль хи-квадрат	3,841	3,841	3,841

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

Если модуль разности между валидированным значением внутреннего стандарта A и общим средним результатом испытаний $\bar{X}$ не превышает удвоенное стандартное отклонение общего среднего, то можно считать, что новый метод ДТС-4 имеет удовлетворительную правильность, то есть найденное значение математического ожидания систематической погрешности не является статистически значимым⁸:

$$|A - \bar{X}| \leq 2 \cdot \sqrt{\frac{S_R^2 - 0,5S_F^2}{N}}, \quad (12)$$

где S_R^2 , S_F^2 – соответственно дисперсия воспроизводимости и повторяемости метода ДТС-4; N – количество испытанных образцов.

Для этого в условиях внутрилабораторной прецизионности по четыре раза ($N = 4$) проводили испытания по методу ДТС-4. Установлено, что во всех случаях разность между средними наблюдаемыми значениями не является статистически значимой, так как она не превышает удвоенного стандартного отклонения общего среднего (табл. 9).

Обобщенную оценку качества моделирования процесса образования отложений, разработки установки ДТС-4 давали по критериям (5) - (7) с использованием данных приведенных в таблицах 3 и 6. Установлено, что отношение стандартного отклонения неисключенной систематической погрешности σ_c к стандартному отклонению внутрилабораторной прецизионности σ_R имеет значения в диапазоне от 0,061 до 0,278 (табл. 10). Следовательно, условие (5) выполнено – не исключенная систематическая погрешность метода ДТС-4 является статистически незначимой величиной.

Таблица 9
Table 9Проверка значимости систематической погрешности метода ДТС-4
Checking the significance of the systematic error of the DTS-4 method

	Температура начала образования отложений, °С	Индекс термостабильности, ед.
ТОС ТРД 1		
Общее среднее значение	131,4	2,02
Валидированное значение	132,7	1,90
Разность	1,3	0,12
Удвоенное стандартное отклонение общего среднего	1,73	0,145
ТОС ТРД 2		
Общее среднее значение	215,5	0,44
Валидированное значение	212,8	0,50
Разность	2,7	0,06
Удвоенное стандартное отклонение общего среднего	3,13	0,083

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

⁸ ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике. – М.: Стандартинформ, 2006 – 50 с.

Сравнение данных таблицы 10 по 1/3 нижней границы диапазона измерений и стандартного отклонения внутрилабораторной прецизионности показывает, что условие (6) не выполняется для показателей «индекс термостабильности» и «скорость перепада давления».

Таблица 10

Table 10

Расчет критериев (5) – (7) для проверки качества моделирования химмотологического процесса образования отложений

Calculation of criteria (5) – (7) to verify the quality of modeling of the chemical process of sediment formation

	Температура начала образования отложений, °C	Индекс термостабильности, ед.	Скорость перепада давления, Па/мин
Диапазон значений			
1/3 нижней границы	40	0,0667	0,3333
min	120	0,2	1
max	250	2	170
Стандартное отклонение неисключенной систематической погрешности, σ_c			
min	0,39	0,0054	0,155
max	1,26	0,0304	3,788
Стандартное отклонение внутрилабораторной прецизионности, σ_R			
min	1,91	0,0872	0,6140
max	4,54	0,1830	13,6980
Отношение σ_c/σ_R			
min	0,202	0,061	0,252
max	0,278	0,166	0,277

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

Однако для всех оценочных показателей метода ДТС-4 выполняется условие (7) - стандартное отклонение внутрилабораторной прецизионности не превышает нижней границы диапазона измерений. Следовательно, при разработке метода ДТС и установки ДТС-4 обеспечено точное регулирование или постоянство основных влияющих факторов, что обеспечивает удовлетворительное качество моделирования процесса образования отложений.

Заключение (Conclusions)

Опыт работы по валидации метода ДТС-4 показывает, что разработанная процедура валидации методов контроля эксплуатационных свойств топлив и моторных масел обеспечивает получение достаточного количества объективных данных о том, что новый метод контроля позволяют получить достоверную информацию о заданном эксплуатационном свойстве исследуемого нефтепродукта.

В ходе валидации метода ДТС-4 были разработаны два типа внутреннего стандарта ТОС ТРД 1 и ТОС ТРД 2, а также экспериментально установлены:

- показатели прецизионности и точности метода ДТС-4;
- способность лабораторной установки ДТС-4 поддерживать в пределах допустимых значений заданные параметры испытания в течение длительного периода времени;
- диапазон значений контролируемых величин (температуры начала образования отложений, индекса термостабильности), характерный для основных марок топлив для реактивных двигателей.

При исследовании чувствительность метода ДТС-4 к изменениям в составе топлив установлено, что значения контролируемых величин в неявном виде зависят от химического и компонентного состава топлива, и он позволяет выявлять образцы топлив с высокой (для сверхзвуковой авиации) и низкой (для дозвуковой авиации) термостабильностью.

При исследовании устойчивости (робастности) метода ДТС-4 установлено, что допустимо отклонение параметров испытаний на 5%, так как это не приводит к появлению сверхнормативной погрешности.

В ходе сравнения нового метода ДТС-4 с известным методом ДТС-2 установлены корреляционные зависимости между получаемыми результатами, показано преимущество метода ДТС-4.

На основании расчета характеристик систематической и случайной погрешности доказано, что при разработке метода и установки ДТС-4 достигнуто точное регулирование (постоянство) основных влияющих факторов, что обеспечивает удовлетворительное качество моделирования процесса образования отложений. Следовательно, метод ДТС-4 позволяет получать данные о склонности топлив для реактивных двигателей адекватные реальным условиям применения исследуемых топлив в газотурбинных двигателях.

Литература

1. Володарский Е.Т., Кошечая Л.А. Валидация методик измерений при аккредитации испытательных лабораторий // Технологический аудит и резервы производства. 2014. № 1. С. 9-11.
2. Коробейников С.М., Лютикова М.Н. Методы контроля влагосодержания жидких диэлектриков. Состояние и проблемы // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 9-10. С. 32-49.
3. Гизатуллин А.Р., Филимонова А.А., Чичирова Н.Д. Разработка и верификация многокомпонентной модели паровой конверсии метана // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26. № 4. С. 124-135.
4. Гарифуллин М.Ш., Слободина Ю.Н., Бикзинуров А.Р., и др. Исследование содержания непредельных углеводородов в трансформаторных маслах с помощью ИК-спектроскопии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. № 5. С. 3-19.
5. Гунар О. В., Буйлова И. А., Колосова Л. В., и др. Применение валидационных исследований для оценки микробиологических методик // Ведомости Научного центра экспертизы средств медицинского применения. 2013. №3. С.4-7. Доступно по: <https://www.vedomostinacesmp.ru/jour/issue/view/28>. Ссылка активна на 04 марта 2025 г.
6. EURACHEM Guide. The Fitness for Purpose of Analytical Methods. A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics. – second edition, 2014. – 69 p.
7. Шаталов К.В. Метрологическое обеспечение испытаний нефтепродуктов: монография. – М.: Изд-во «Первый том», 2021. – 1088 с.
8. Validation of Analytical Procedures: Methodology/ ICH Q2B /CGMP/ICH/281/95
9. Ваганова О.А., Касакин И.А., Скобелев Д.О. Валидация аналитических методик // Методы оценки соответствия. 2007. № 8. С. 12-14.
10. Зеленская Р.Г., Резников В.Д., Белянчиков Г.П., и др. Эталонные моторные масла // Сборник трудов ВНИИ НП, Вып. XXV. Новые методы испытания моторных масел. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1977. С.24-30.
11. Шаталов К.В. Новый способ определения показателей прецизионности и точности методик лабораторно-стендовых испытаний нефтепродуктов // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. Вып. 61. 2023. С. 257 – 274.
12. Шаталов К.В. Робастные процедуры оценки показателей прецизионности и точности методик измерений величин, характеризующих состав и свойств нефтепродуктов // Южно-Сибирский научный вестник. 2022. № 4. – С.67-73. Доступно по: <http://s-sibsb.ru>. Ссылка активна на 14 февраля 2025 г.
13. Астафьев В.А., Анисимов Д.И., Шаталов К.В. Установка для определения термоокислительной стабильности топлив в динамических условиях. Патент РФ на изобретение № 2609861. 06.02.2017, Бюл. № 6.
14. Шаталов К.В., Волгин С.Н. Методы оценки склонности к образованию отложений и сохраняемости топлив для реактивных двигателей // Химия и технология топлив и масел. 2024. № 6. С. 22-30.
15. Анисимов Д.И., Журавлева В.Д., Лихтерова Н.М. Программа «АУСЧ ДТС-4» автоматического управления считывающим устройством установки ДТС-4 для оценки термоокислительной стабильности в динамических условиях топлив для реактивных двигателей. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021662868. 06.08.2021.
16. Гладких В.А., Серегин Е.П., Сашевский В.В., и др. Определение термической стабильности реактивных топлив в динамических условиях // Химия и технология топлив и масел. 1977. № 2. С.48-51.

Авторы публикации

Шаталов Константин Васильевич – канд. техн. наук, доцент, начальник отдела квалификационных испытаний топлив и масел 25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России, г. Москва, Россия. E-mail: 1499090@mail.ru

Зверева Эльвира Рафиковна – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. E-mail: 6elvira6@list.ru

References

1. Volodarskij ET, Koshevaya LA. Validaciya metodik izmerenij pri akkreditacii ispytatel'nyh laboratorij. *Tekhnologicheskij audit i rezervy proizvodstva*. 2014; 1: 9-11. (In Russ)
2. Korobeynikov SM, Lyutikova MN. Liquid insulating materials moisture content control methods. Condition and problems. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017; 19(9-10): 32-49. (In Russ). doi: 10.30724/1998-9903-2017-19-9-10-32-49
3. Gizzatullin AR, Filimonova AA, Chichirova ND. Development and verification of a multicomponent model for steam methane reforming // *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26(4): 124-135. (In Russ). doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-4-124-135
4. Garifullin MSh, Slobodina YN, Bikzinurov AR., et al. Investigation of the content of unsaturated hydrocarbons in transformer oils using IR spectroscopy. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25(5): 3-19. (In Russ). doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-5-3-19
5. Gunar OV, Bujlova IA, Kolosova LV., et al. Primenenie validacionnyh issledovanij dlya ocenki mikrobiologicheskikh metodik. *Vedomosti Nauchnogo centra ekspertizy sredstv medicinskogo primeneniya*. 2013; 3: 4-7. (In Russ).
6. EURACHEM Guide. The Fitness for Purpose of Analytical Methods. A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics. – second edition, 2014.
7. Shatalov KV. *Metrologicheskoe obespechenie ispytaniy nefteproduktov: monografiya*. – Moscow: «Pervyj tom»; 2021. (In Russ).
8. Validation of Analytical Procedures: Methodology/ ICH Q2B /CGMP/ICH/281/95.
9. Vaganova OA, Kasakin IA, Skobelev DO. Validaciya analiticheskikh metodik. *Metody ocenki sootvetstviya*. 2007; 8: 12-14. (In Russ).
10. Zelenskaya RG, Reznikov VD, Belyanchikov GP., et al. Etalonnye motornye masla. *Sbornik trudov VNII NP. Novye metody ispytaniya motornyh masel*. 1977; XXV: 24-30. (In Russ).
11. Shatalov KV. Novyj sposob opredeleniya pokazatelej precizionnosti i tochnosti metodik laboratorno-stendovyh ispytaniy nefteproduktov. *Trudy 25 GosNII MO RF*. 2023; 61:257 – 274. (In Russ).
12. Shatalov KV. Robastnye procedury ocenki pokazatelej precizionnosti i tochnosti metodik izmerenij velichin, karakterizuyushchih sostav i svoystv nefteproduktov. *Yuzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik*. 2022; 4:67-73. Available at: <http://s-sibsb.ru>. Accessed: 14 Feb 2025. (In Russ).
13. Astafev VA, Anisimov DI, Shatalov KV. *Ustanovka dlya opredeleniya termookislitel'noj stabil'nosti topliv v dinamicheskikh usloviyah*. Patent RUS № 2609861. 06.02.2017, Byul. № 6. (In Russ).
14. Shatalov KV, Volgin SN. Metody ocenki sklonnosti k obrazovaniyu otlozhenij i sohranyaemosti topliv dlya reaktivnyh dvigatelej. *Himiya i tekhnologiya topliv i masel*. 2024; 6: 22-30. (In Russ).
15. Anisimov DI, Zhuravleva VD, Lihterova NM. *Programma «AUSCh DTS-4» avtomaticheskogo upravleniya schityvayushchim ustrojstvom ustanovki DTS-4 dlya ocenki termookislitel'noj stabil'nosti v dinamicheskikh usloviyah topliv dlya reaktivnyh dvigatelej*. Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM № 2021662868. 06.08.2021. (In Russ).
16. Gladkih VA, Seregin EP, Sashevskij VV., et al. Opredelenie termicheskoj stabil'nosti reaktivnyh topliv v dinamicheskikh usloviyah. *Himiya i tekhnologiya topliv i masel*. 1977; 2: 48-51. (In Russ).

Authors of the publication

Konstantin V. Shatalov – 25-th State Research Institute of Chemmotology, Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russia. E-mail: 1499090@mail.ru

Elvira R. Zvereva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: 6elvira6@list.ru

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

Получено

09.03.2025 г.

Отредактировано

01.04.2025 г.

Принято

11.04.2025 г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.311:621.867.2

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-2-49-62

ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КОМПЕНСАТОРА ИСКАЖЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Дзюин Д.В., Скопин Г.А., Комков А.Н., Дмитриева В.В.

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

dzyuin.d@gubkin.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в решении проблемы негативного влияния искажений напряжения на системы электропривода ленточных конвейеров, вызываемой нарушением формы кривой напряжения в системах электроснабжения предприятий угледобывающего комплекса. ЦЕЛЬ работы заключается в разработке математической и компьютерной модели, иллюстрирующей эффективность применения динамического компенсатора искажений напряжения (ДКИН) для системы многодвигательного электропривода ленточного конвейера, питающейся от подземной электрической сети. МЕТОДЫ. В качестве объекта исследования рассмотрена многодвигательная электромеханическая система из трёх низковольтных асинхронных двигателей BA280S4 суммарной мощностью 330 кВт, составляющая электропривод шахтной ленточной конвейерной установки 2Л100У-01. Исследование работы ДКИН в рассматриваемой электромеханической системе выполнено методом компьютерного моделирования данной системы в программной среде MATLAB/Simulink®. РЕЗУЛЬТАТЫ. Моделирование работы системы с ДКИН и с его отсутствием выполнено для следующих режимов: исследование статической устойчивости системы при снижении величины напряжения сети до 0,5 о.е. от номинального; исследование динамической устойчивости системы при исчезновении напряжения сети в течение до 8 с; возникновение несинусоидальности и несимметрии напряжения в течение 1-2 с. Результаты моделирования подтверждают, что без применения ДКИН работа привода конвейера в условиях несимметрии напряжения характеризуется многократными перегрузками по моменту, а в случаях снижения напряжения до 0,5 о.е. от номинального или его исчезновения на время более 8 с – потерей устойчивости по скорости. Применение ДКИН обеспечивает восстановление формы кривой напряжения и устойчивость переходных характеристик по скорости и по моменту привода. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Проведённое исследование показывает, что ДКИН является эффективным способом обеспечения устойчивого и надёжного функционирования низковольтных многодвигательных электроприводов конвейерных установок высокопроизводительных угольных шахт. Обоснована рекомендация к внедрению ДКИН на предприятиях угледобывающего комплекса.

Ключевые слова: динамический компенсатор искажений напряжения (ДКИН); форма кривой напряжения; подземные электрические сети; ленточный конвейер; многодвигательный электропривод; электромеханическая система; качество электроэнергии.

Для цитирования: Дзюин Д.В., Скопин Г.А., Комков А.Н., Дмитриева В.В. Применение динамического компенсатора искажений напряжения в системе многодвигательного электропривода ленточного конвейера // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 49-62. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-49-62.

DYNAMIC VOLTAGE RESTORER APPLICATION IN THE MULTI-MOTOR ELECTRIC DRIVE SYSTEM OF A BELT CONVEYOR

Dzyuin D.V., Skopin G.A., Komkov A.N., Dmitrieva V.V.

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

dzyuin.d@gubkin.ru

Abstract: *RELEVANCE* of this research lies in addressing the issue of the voltage distortions' negative impact on belt conveyor electric drive systems, caused by irregularities in the voltage waveform of power supply networks at coal mining facilities. *THE PURPOSE* of this study is to create a mathematical and computer model that demonstrates the effectiveness of using a dynamic voltage restorer (DVR) in a belt conveyor multi-motor electrical drive system powered by an underground electrical network. *METHODS.* A multi-motor electromechanical system consisting of three BA280S4 low-voltage asynchronous motors with a total power of 330 kW making up the electric drive for the 2L100U-01 mining belt conveyor system is the object of this research. The study of the DVR operation in the electromechanical system under consideration was carried out by computer modeling using the MATLAB/Simulink® software. *RESULTS.* Simulation of system operation with the DVR and without it was performed for the following modes: studying the static stability of the system when the grid voltage reduces to 0.5 pu of its nominal value, studying the dynamic stability when the grid voltage fails for up to 8 seconds, the occurrence of non-sinusoidal and asymmetric voltage waveforms for 1-2 seconds. The simulation results confirm that, without the use of a DVR, the operation of the conveyor drive under voltage asymmetry conditions is characterized by multiple torque overloads, and in cases where voltage is reduced to 0.5 pu of the nominal value or is cut off for more than 8 seconds, there is a loss of speed stability. The use of the DVR ensures the restoration of the voltage waveform and the stability of the transient characteristics of drive speed and torque. *CONCLUSION.* The conducted research illustrates that the DVR is an effective way to ensure stable and reliable operation of low-voltage multi-motor electric drives in high-performance coal mining belt conveyor facilities. The introduction of a DVR is reasonably recommended for coal mining enterprises.

Keywords: dynamic voltage restorer (DVR); voltage waveform; underground electric networks; belt conveyor; multi-motor electric drive; electromechanical system; power quality.

For citation: Dzyuin D.V., Skopin G.A., Komkov A.N., Dmitrieva V.V. Dynamic voltage restorer application in the multi-motor electric drive system of a belt conveyor. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (2): 49-62. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-49-62.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

Анализ электропотребления предприятий угледобывающего комплекса [1] показывает, что примерно 57% потребителей электроэнергии относятся к подземным выработкам, куда входит энергоемкое технологическое оборудование комплексно-механизированных забоев, конвейерного транспорта, подготовительных и вспомогательных процессов. Как указывают отечественные [2] и зарубежные [3] источники, надёжность и экономическая эффективность горнодобывающего предприятия зависит от согласованности составляющих ее элементов, поэтому выход из строя любой составляющей приводит к нарушению непрерывности технологического процесса, простоя оборудования, и, в результате, к уменьшению объёма и увеличению себестоимости добычи. В целях снижения эксплуатационных издержек и эффективного функционирования предприятий угледобывающего комплекса, подземные электрические сети должны обеспечивать бесперебойное электроснабжение всей технологической цепочки с обязательным соблюдением показателей качества электроэнергии по ГОСТ 32144-2013 [1, 4].

Как показывают исследования системы электроснабжения угольных шахт АО «СУЭК-Кузбасс» в работе Л.А. Плащанского и др. [1], данные по Забайкальской электроэнергетической системе в работе В.В. Романовой и др. [2], а также работы Ю.А. Сычева и др. [4], О. Sinyavsky и др. [5], форма кривой напряжения в подземных электрических сетях предприятий минерально-сырьевого комплекса характеризуется

несимметрией и несинусоидальностью по причине большого количества нелинейной нагрузки, в состав которой входят преобразовательные устройства. Значения величин отклонения напряжения, коэффициента несимметрии, коэффициента гармонических искажений синусоиды превышают регламентированные ГОСТ 32144-2013 показатели в 2-3 раза [2]. Примерно 80% нагрузки в подземных электрических сетях составляют системы асинхронного электропривода производственных механизмов [1, 2], на которые оказывают негативное влияние искажения напряжения: как показывают результаты недавних исследований, электрические потери возрастают на 20% [4], срок службы асинхронных двигателей снижается в 2 раза [6], что приводит к дополнительным затратам на реновацию оборудования.

Наибольший потенциал повышения энергоэффективности предприятий угледобывающего комплекса рассматривается отечественными [7] и зарубежными [5, 8] исследователями в части эксплуатации электропривода шахтных ленточных конвейеров, поскольку, согласно обобщённым заявлениям горнодобывающих компаний, транспортировка вскрышных пород и угля из шахты составляют примерно половину общих производственных затрат на одну тонну добытого угля. В процессе эксплуатации высокопроизводительных ленточных конвейеров в условиях нарушений электроснабжения, электрическая часть привода подвергается перегрузкам, что обязательно передаётся на механическую часть, приводя к нарушению непрерывности технологического процесса транспортировки груза, внеплановым остановкам конвейера, снижению срока службы привода и ленты, и, следовательно, к значительным экономическим убыткам [8]. В случае многодвигательного привода конвейерной установки изменение условий эксплуатации системы не позволяет однозначно оценить эффективность её работы по причине взаимного влияния электродвигателей друг на друга. Как показано в работе А.А. Реутова [7], схема привода конвейера с тремя двигателями не обладает эффективностью ни по одному из обобщённых показателей в неопределённых условиях эксплуатации. Поэтому проблема повышения качества электроэнергии в системах многодвигательного электропривода ленточных конвейеров имеет особую актуальность.

На сегодняшний день исследователи рассматривают применение активных, пассивных или гибридных устройств компенсации искажений напряжения как наиболее доступное решение проблемы повышения качества электроэнергии [1, 4]. Как показывают в своей работе В.И. Зацепина и др. [9], максимальную эффективность имеет способ комплексного динамического подавления всех искажений кривой напряжения, включающих в себя провалы, перенапряжения и высшие гармоники. Вероятность и характер искажений напряжения не подлежат достаточно точному прогнозированию, поэтому для повышения качества электроэнергии требуются универсальность и максимальное быстроедействие компенсирующего устройства.

Обзор вышедших в последние годы статей отечественных [4, 9, 10] и зарубежных [11-14] авторов показывает, что современным и хорошо зарекомендовавшим себя устройством коррекции качества электроэнергии для систем мощностью не более 1 МВА является динамический компенсатор искажений напряжения (ДКИН). Данное устройство реализует восстановление формы кривой напряжения путём непрерывной подачи в сеть дополнительной величины напряжения компенсации через активное преобразовательное устройство и вольтодобавочный трансформатор. Будучи активным компенсатором, ДКИН превосходит пассивные фильтрокомпенсирующие устройства по быстрдействию, по качеству переходных процессов и по числу реализуемых функций в области компенсации высших гармоник тока и напряжения, отклонений величины напряжения [4, 11, 12]. При возникновении КЗ во внешней сети ДКИН способен устранить возникший провал на стороне низшего номинального напряжения [10]. Усовершенствование стратегии управления ДКИН путём перехода от пропорционально-интегрального регулятора к скользящему режиму управления позволяет сократить продолжительность и величину провала напряжения на 30% [13], а коэффициент суммарных гармонических искажений напряжения до значения 0,38% [14].

Внедрение ДКИН в системы электроснабжения угольных шахт на группу отдельных потребителей позволило бы создать резерв в системе электропотребления; установить пиковые нагрузки на сеть с последующим их перераспределением для максимального повышения эффективности угледобычи, поскольку каждая шахта как производственная система обладает значительным резервом для перераспределения мощности [3].

Несмотря на достаточно большое количество исследований, посвящённых

энергетической эффективности ДКИН в системах электроснабжения, в том числе в сетях предприятий минерально-сырьевого комплекса, на данный момент остаётся неисследованной целесообразность применения ДКИН в системах многодвигательного электропривода ленточных конвейеров с целью устранения негативного влияния искажений напряжения на работу электромеханической системы. Исходя из вышеизложенного, авторами статьи было предложено применение ДКИН в системе низковольтного многодвигательного электропривода шахтной ленточной конвейерной установки. Группа из трёх приводных асинхронных двигателей BA280S4 суммарной мощностью 330 кВт является нагрузкой в рассматриваемой электротехнической системе.

Основная цель данной работы состоит в разработке математической и компьютерной модели, иллюстрирующей технологическую эффективность внедрения ДКИН в систему многодвигательного электропривода ленточного конвейера. Для достижения цели в данной работе решены следующие задачи:

1. Проведён анализ современной литературы и выбрана методика математического моделирования ДКИН и электромеханической системы;
2. Разработана математическая модель ДКИН, ленточного конвейера и системы электроснабжения, а также соответствующая ей компьютерная модель в программной среде MATLAB/Simulink®;
3. Выполнено компьютерное моделирование рассматриваемой системы с ДКИН и с его отсутствием для различных видов нарушения формы кривой напряжения, изучено влияние искажений напряжения на электрическую и механическую часть привода при наличии и отсутствии динамической компенсации этих искажений;
4. Проанализированы результаты моделирования, по которым оценена эффективность применения ДКИН в системах низковольтных многодвигательных электроприводов шахтных ленточных конвейеров.

Научная значимость выполненной работы заключается в используемом методологическом подходе к обоснованию технологической эффективности применения ДКИН в системе многодвигательного электропривода ленточного конвейера. Предложено рассмотрение влияния искажений напряжения с компенсацией и без неё непосредственно на механическую часть привода конвейера, включающую в себя приводные барабаны и ленту.

Практическая значимость результатов исследования заключается в разработке математической модели ДКИН и ленточной конвейерной установки, в выявлении критических значений провалов напряжения для рассматриваемой электромеханической системы, в определении рекомендуемых режимов работы ДКИН, способствующих поддержанию работоспособности многодвигательного привода ленточного конвейера.

Материалы и методы (Materials and methods)

Объектом представленного в данной работе экспериментального исследования является ленточная конвейерная установка марки 2Л100У-01 от изготовителя АО «Завод имени М.И. Платова» с максимальной производительностью 850 т/ч, длиной поставки 1500 м и шириной ленты 1000 мм. Технологические схемы и технические характеристики данного конвейера приведены в [15]. Рассматриваемая конвейерная установка имеет систему двухбарабанного асинхронного редукторного электропривода напряжением 0,4 кВ, укомплектованную тремя асинхронными двигателями марки BA280S4 мощностью по 110 кВт каждый.

Перед внедрением устройства динамической компенсации искажений напряжения в существующую электротехническую систему осуществляется выбор модификации ДКИН. На практике наиболее успешным и рациональным в использовании показывает себя ДКИН с источником питания и преобразовательным устройством, что позволяет повысить отказоустойчивость системы в случае возникновения внештатных ситуаций на линии независимого питания и обеспечить независимость кратковременной работы самого устройства [12]. Исходя из необходимости повышения надежности и обеспечения устойчивой работы системы электропривода, был выбран вариант размещения устройства ДКИН на стороне низшего напряжения с применением вольтодобавочного трансформатора, инвертора на IGBT и источника питания в виде комплекса аккумуляторных батарей совместно с шестипульсным выпрямителем звезда-Ларионов. Данный выбор также обусловлен возможностью сохранить преимущества использования ДКИН при значительном сокращении затрат. Схема предложенного устройства ДКИН, внедрённого в электротехническую систему, представлена на рисунке 1.

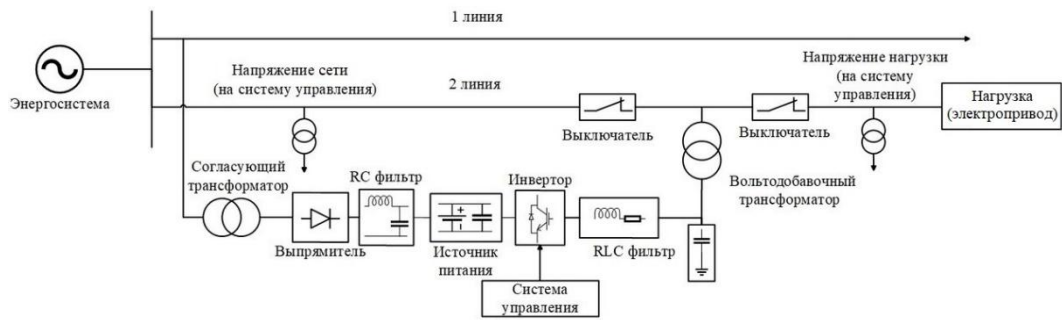


Рис. 1. Схема устройства динамической компенсации искажений напряжения в электротехнической системе

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

Электротехническая и электромеханическая система на рисунке 1 требует исследования режимов её работы с возможностью проведения серии экспериментов, включающих в себя задание ненормальных исходных параметров, расчёт значений исследуемых величин, построение переходных характеристик и анализ полученных данных. Поэтому в данной работе исследование выполнено методом математического описания рассматриваемого объекта и последующего компьютерного моделирования в программном комплексе MATLAB/Simulink®.

Принцип работы ДКИН заключается в двойном преобразовании напряжения и дальнейшей передаче недостающей части напряжения на нагрузку. Первоначально осуществляется питание накопителя электроэнергии с шинпровода низшего напряжения через согласующий трансформатор и выпрямитель. Первичное преобразование напряжения, реализуемое выпрямителем, описывается формулой (1):

$$U_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cdot U_m, \quad (1)$$

где U_{dc} – среднее значение постоянного напряжения на выходе выпрямителя, U_m – амплитуда величины переменного напряжения после согласующего трансформатора.

Полученное по (1) постоянное напряжение U_{dc} на выходе выпрямителя подвергается фильтрации и в дальнейшем преобразуется инвертором в переменное. Используемая двухуровневая шестипульсная мостовая схема инвертора на IGBT обеспечивает высокую скорость переключений и эффективность компенсации.

Управление устройством ДКИН осуществляется методом сравнения параметров, исходя из недостающего значения величины напряжения на входе системы управления (СУ). СУ отслеживает состояние напряжения сети и регулирует работу устройства методом модуляции пространственного вектора, который предполагает преобразование трёхфазных напряжений в двумерные координаты методом преобразований Кларк и Парка. Схема системы управления ДКИН представлена на рисунке 2.

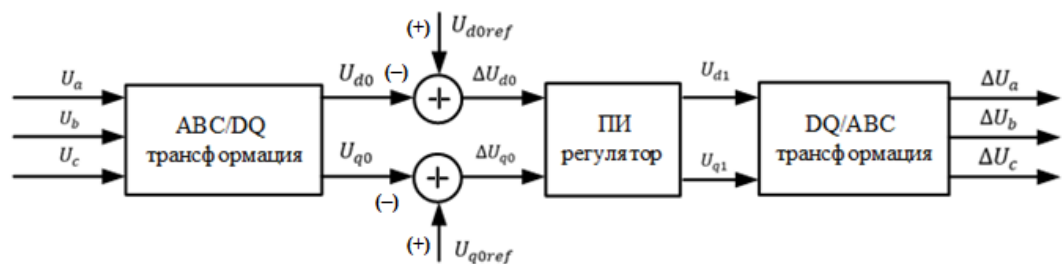


Рис. 2. Схема системы управления ДКИН методом модуляции пространственного вектора

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

Как показано на рисунке 2, номинальное фазное напряжение U_a , U_b , U_c , представленное в относительных единицах, подаётся на блок преобразования $abc \rightarrow dq0$, который реализует комбинированное преобразование Кларк и Парка. В ходе этого преобразования трёхфазный сигнал в координатах abc , совместно с параметром ωt – опорным фазовым углом, задаваемым виртуальной фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ), – преобразуется в синхронные координаты $dq0$. Использование виртуального ФАПЧ обусловлено его способностью имитировать выход реального устройства,

основываясь на заданных параметрах частоты сети 50 Гц, в отличие от классического ФАПЧ, который динамически подстраивает частоту в соответствии с входным сигналом. Это упрощает компьютерное моделирование, так как фокус исследования не направлен на динамическое отслеживание фазового или частотного рассогласования.

Таким образом, трёхфазная синусоидальная система напряжений в новой системе координат представляется вектором с фиксированными проекциями на оси, синхронно поворачивающиеся на угол ωt . Комбинированное преобразование Кларк и Парка можно описать формулой (2):

$$U = \begin{bmatrix} U_{d0} \\ U_{q0} \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\omega t) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}. \quad (2)$$

После выполнения вышеописанного преобразования (2) полученный сигнал поступает на селектор, отделяющий необходимые далее проекции d и q , на базе которых производится управление ДКИН. Тогда, с учетом возникшего отклонения, конечная матричная функция примет вид (3):

$$\Delta U = \begin{bmatrix} \Delta U_{d0} \\ \Delta U_{q0} \\ \Delta U_0 \end{bmatrix} = U_{ref} - U = \begin{bmatrix} U_{d0ref} - U_{d0} \\ U_{q0ref} - U_{q0} \\ U_{0ref} - U_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - U_{d0} \\ 0 - U_{q0} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где U_{ref} – вектор проекций опорных значений напряжения, равный (4):

$$\begin{bmatrix} U_{d0ref} \\ U_{q0ref} \\ U_{0ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

В данном случае U_{ref} принимает значения (4) исходя из того, что сравнение значений в системе СУ происходит в относительных единицах. Продольная и поперечная составляющие опорного напряжения d и q равны 1 и 0 соответственно. В случае искажений напряжения, выходные сигналы U_{d0} и U_{q0} резко уменьшаются, вследствие чего сумматор в схеме на рисунке 2 определит отклонение значений U_{d0} и U_{q0} от номинальных.

Для повышения точности компенсации, после проведения сравнения отклонений напряжения от опорных значений, в схеме используется регулятор с пропорционально-интегральным (ПИ) законом управления. Пропорциональная K_p и интегральная K_i составляющие регулятора настроены по методу Зиглера-Никольса, который основан на использовании запасов устойчивости.

Значения проекций сигнала управления U_{d1} и U_{q1} на выходе ПИ-регулятора принимают вид (5):

$$\begin{cases} U_{d1} = K_p(\Delta U_{d0}) + K_i \int (\Delta U_{d0}) dt \\ U_{q1} = K_p(\Delta U_{q0}) + K_i \int (\Delta U_{q0}) dt \end{cases}. \quad (5)$$

После регулирования значения сигналов из (5) переходят в блок обратной трансформации Парка-Кларк $dq0 \rightarrow abc$, в результате чего по формуле (6) формируется вектор управляющего сигнала ΔU_{abc} :

$$\Delta U_{abc} = \begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 1 \\ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{d1} \\ U_{q1} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Трёхфазный сигнал управления ΔU_{abc} поступает на блок широтно-импульсной модуляции (ШИМ), управляющий переключением полупроводниковых ключей инверторной части ДКИН. Напряжение на выходе транзисторов сглаживается и через вольтодобавочный трансформатор добавляется на сторону нагрузки, компенсируя недостающую часть напряжения сети.

Соответствующая математическому описанию компьютерная модель электротехнической системы с ДКИН и ленточным конвейером реализована в программной среде MATLAB/Simulink®, как показано на рисунке 3. Внутренняя структура блока модели ДКИН, описанная уравнениями (1)–(6), приведена в работе [16]. Математическая модель ленточного конвейера 2Л100У-01 и соответствующая ей компьютерная модель в MATLAB/Simulink® была разработана ранее в работе [15]. Компоненты трёхфазной электрической сети с возможностью двунаправленного обмена

электроэнергией моделируются блоками из библиотеки «Specialized Power Systems».

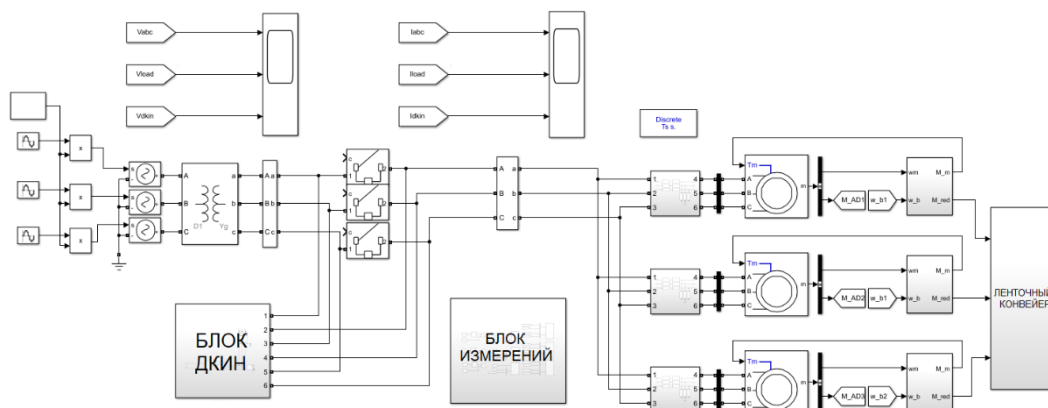


Рис. 3. Компьютерная модель электротехнической системы с ДКИН и ленточным конвейером 2Л100У-01 в MATLAB/Simulink®

Fig. 3. Computer model of an electric power system with the DVR and 2L100U-01 belt conveyor in MATLAB/Simulink®

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

Разработанная компьютерная модель позволяет проводить имитационное моделирование переходных процессов по электрическим и механическим величинам в системе многодвигательного электропривода ленточного конвейера при заданных различных искажениях кривой напряжения сети.

Моделирование работы электротехнической системы с подключением устройства ДКИН и с его отсутствием выполнено для следующих режимов:

- 1) возникновение несинусоидальности и несимметрии напряжения при изменении амплитуды или гармонического состава напряжения в одной фазе в течение 1-2 с;
- 2) исследование статической устойчивости системы при снижении величины напряжения во всех трёх фазах до 0,5 о.е. от номинального;
- 3) исследование динамической устойчивости системы при полном прерывании напряжения во всех трёх фазах в течение до 8 с.

Остальные исходные параметры системы оставались неизменными на протяжении каждой итерации моделирования.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Результаты компьютерного моделирования представлены на рисунках 4-10 в виде осциллограмм, иллюстрирующих изменения напряжения сети и нагрузки, а также переходные процессы по скорости и моменту привода и ленты конвейера при нарушениях электроснабжения в системе с ДКИН или без него.

Осциллограммы угловой скорости и момента привода конвейера в условиях несимметрии и несинусоидальности напряжения сети без применения ДКИН (рис. 5а) иллюстрируют, что при наличии хотя бы в одной фазе продолжающихся в течение 1-2 с отклонений амплитуды напряжения на 0,1 о.е. от номинального значения, а также дополнительных гармоник напряжения с отклонением от основной частоты сети минимум на 5 Гц, имеют место просадки угловой скорости и 2-4-кратные превышения момента привода конвейера. Подключённый к электротехнической системе ДКИН полностью восстанавливает форму кривой напряжения на стороне нагрузки (рис. 4) с коэффициентом суммарных гармонических искажений по напряжению $THD = 3\%$, что гораздо ниже регламентированного ГОСТ 32144-2013 порогового значения $THD = 8\%$ для напряжения 0,4 кВ.

Осциллограммы угловой скорости и момента привода конвейера при подключении ДКИН (рис. 5б) подтверждают, что при восстановлении формы кривой напряжения обеспечивается своевременное устранение всех продолжительных высокочастотных колебаний скорости и момента привода, вызванных нелинейными искажениями напряжения питающей сети. Колебания момента привода в установившемся режиме с полупериодом 15 с, а также обусловленные проскальзыванием ленты колебания угловой скорости точки ленты в течение 17-секундного пуска конвейера являются особенностями многомассовой системы, как было показано в [15], поэтому они не зависят от качества электроэнергии.

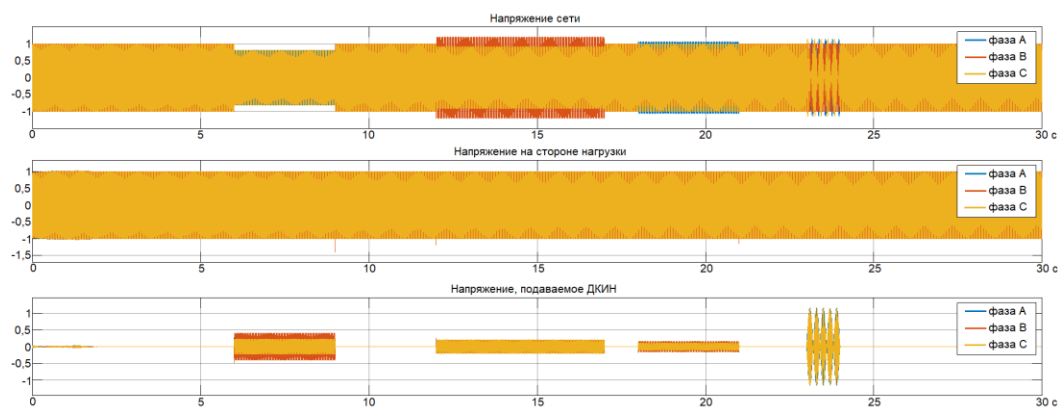


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на стороне сети, нагрузки и ДКИН при наличии несинусоидальности и несимметрии формы кривой напряжения сети

Fig. 4. Oscillograms of the power grid, load side and DVR voltage with non-sinusoidal and asymmetrical grid voltage waveform

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

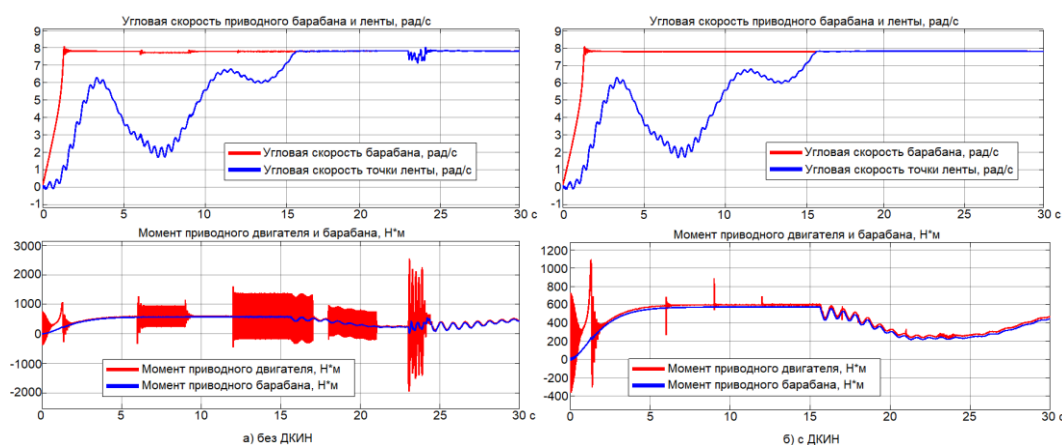


Рис. 5. Осциллограммы угловой скорости и момента привода конвейера в условиях несинусоидальности и несимметрии напряжения сети в системе без ДКИН (а) и с ДКИН (б)

Fig. 5. Oscillograms of the conveyor drive angular velocity and torque under the conditions of non-sinusoidal and asymmetrical grid voltage waveform in a system without the DVR (a) and with the DVR (b)

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

На рисунках 6-7 представлены осциллограммы напряжения, угловой скорости и момента электропривода конвейерной установки при исследовании статической устойчивости рассматриваемой системы. В ходе эксперимента напряжение сети было понижено до 0,5 номинальной величины с шагом 0,1 (рис. 6). В каждый момент времени, соответствующий снижению напряжения, в системе без ДКИН возникает значительная пульсация электромагнитного момента привода (рис. 7а), наличие же в системе ДКИН позволяет полностью восстановить напряжение на стороне нагрузки и исключить пульсации момента (рис. 6, рис. 7б). При снижении напряжения до 0,5 номинального и ниже в системе без ДКИН происходит нарушение устойчивости привода по скорости (рис. 7а), что на практике будет приводить к аварийному останову ленточного конвейера. При условии восстановления электроснабжения, за каждым внеплановым остановом следует тяжелый режим прямого пуска полностью загруженного конвейера.

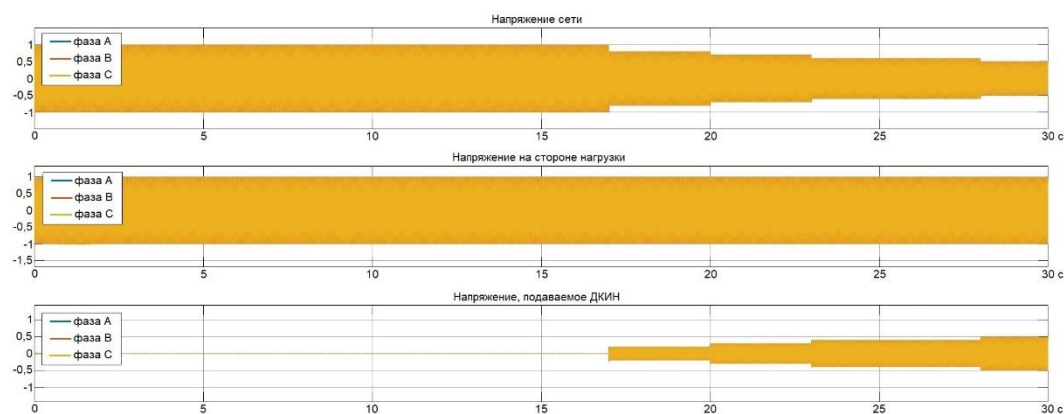


Рис. 6. Осциллограммы напряжения на стороне сети, нагрузки и ДКИН при снижении

Fig. 6. Oscillograms of the power grid, load side and DVR voltage under the conditions of the grid voltage reduction in order to study the static stability of the system

напряжения сети в целях исследования статической устойчивости системы

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

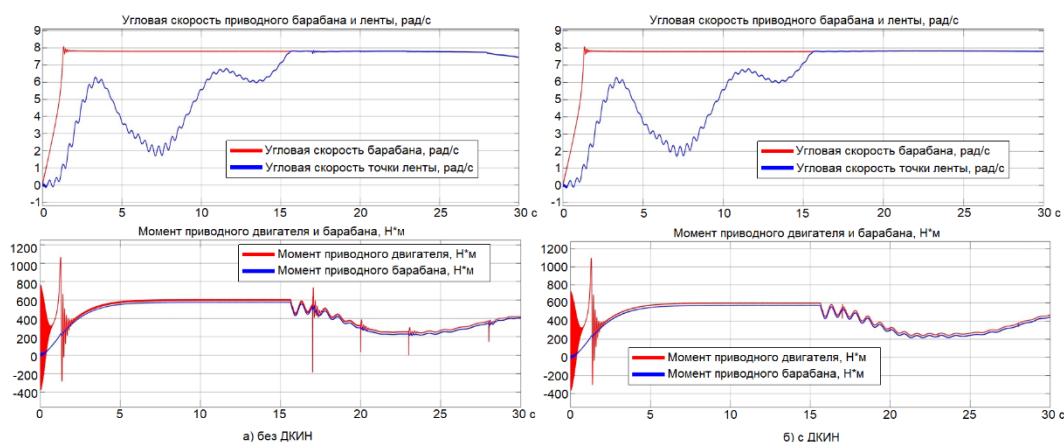


Рис. 7. Осциллограммы угловой скорости и момента привода конвейера в условиях снижения напряжения сети в системе без ДКИН (а) и с ДКИН (б)

Fig. 7. Oscillograms of the conveyor drive angular velocity and torque under the conditions of the grid voltage reduction in a system without the DVR (a) and with the DVR (b)

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

На рисунках 8-10 представлены осциллограммы напряжения, угловой скорости и момента электропривода конвейерной установки при исследовании динамической устойчивости рассматриваемой системы. В ходе серии экспериментов система электропривода ленточного конвейера, выведенная на номинальную скорость привода и ленты, была подвержена полному отключению напряжения сети на время от 1 с до 8 с.

Как показывают результаты моделирования (рис. 9), при последующем восстановлении электроснабжения после прерывания напряжения длительностью менее 8 секунд система электропривода способна вернуться к нормальному режиму работы. Серия опытов позволила установить, что если величина интервала отсутствия напряжения составляет минимум 4 с, то выход ленты на номинальную скорость сопровождается пробуксовкой (проскальзыванием) ленты на каждом приводном барабане (рис. 9а). Каждое прерывание сетевого напряжения характеризуется однократной пульсацией электромагнитного момента приводных двигателей, направленной против направления вращения вала и в 6 раз превышающей величину номинального момента привода.

При исчезновении напряжения в течение 8 с и более, система электропривода конвейера теряет устойчивость по скорости (рис. 10а). Компенсация прерываний напряжения устройством ДКИН (рис. 9б, рис. 10б) позволяет обеспечить динамическую устойчивость системы, сократить величину рассматриваемых пульсаций момента до двух- или трёхкратной от номинальной, а также полностью устранить просадки угловой скорости привода и пробуксовки ленты, вызванные нарушениями электроснабжения.

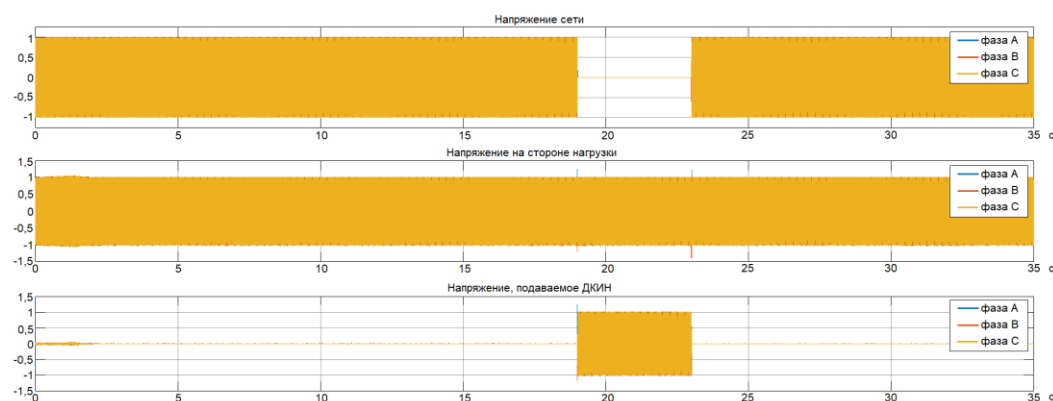


Рис. 8. Осциллограммы напряжения на стороне сети, нагрузки и ДКИН при исчезновении напряжения сети в течение 4 с при исследовании динамической устойчивости системы

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

Fig. 8. Oscillograms of the power grid, load side and DVR voltage under the conditions of the grid voltage failure for 4 s when studying the dynamic stability of the system

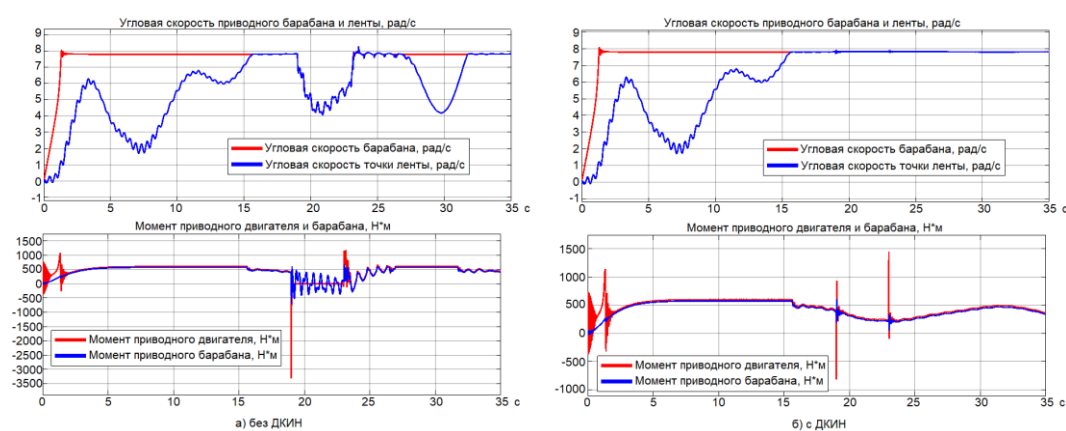


Рис. 9. Осциллограммы угловой скорости и момента привода конвейера в условиях исчезновения напряжения сети в течение 4 с в системе без ДКИН (а) и с ДКИН (б)

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

Fig. 9. Oscillograms of the conveyor drive angular velocity and torque under the conditions of the grid voltage failure for 4 s in a system without the DVR (a) and with the DVR (b)

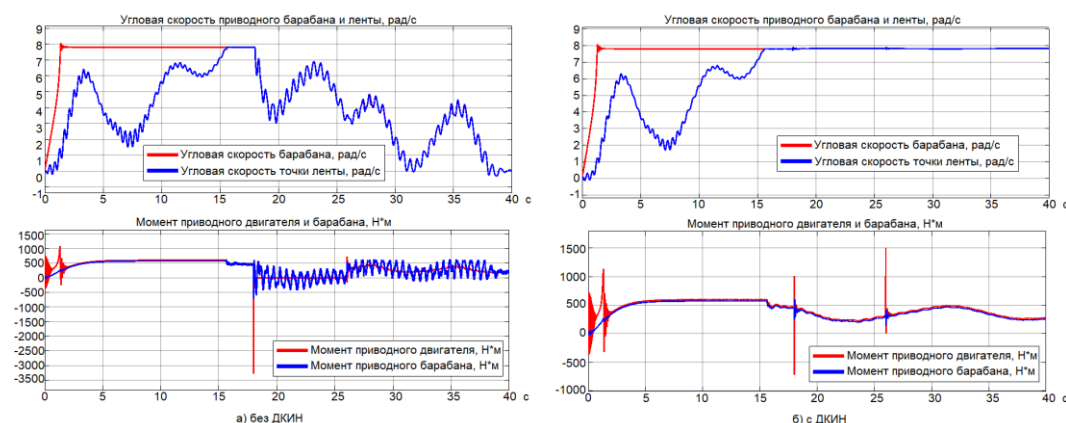


Рис. 10. Осциллограммы угловой скорости и момента привода конвейера в условиях исчезновения напряжения сети в течение 8 с в системе без ДКИН (а) и с ДКИН (б)

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

Fig. 10. Oscillograms of the conveyor drive angular velocity and torque under the conditions of the grid voltage failure for 8 s in a system without the DVR (a) and with the DVR (b)

Переходя к оценке полученных результатов исследования, можно отметить, что использование устройства ДКИН показало значительное улучшение характеристик работы шахтного ленточного конвейера в условиях искажений формы кривой напряжения сети. Компьютерное моделирование позволило определить границу статической и

динамической устойчивости системы многодвигательного электропривода конвейерной установки 2Л100У-01, а также подтвердить, что ДКИН способен поддерживать устойчивость и работоспособность системы в условиях снижения напряжения питающей сети или кратковременных отключениях электроснабжения, что обычно приводит к нарушению устойчивости электротехнической системы без ДКИН. Результаты серии экспериментов продемонстрировали следующие преимущества внедрения ДКИН в рассматриваемую электротехническую систему:

1. ДКИН улучшает условия эксплуатации механической части электропривода при наличии несимметрии и несинусоидальности напряжения сети, так как своевременное восстановление формы кривой напряжения не допускает возникновения колебаний скорости и перегрузок по моменту привода. Поддержание регламентированных параметров напряжения на зажимах асинхронных двигателей приводит к меньшему перегреву обмоток, меньшему механическому износу оборудования и, следовательно, отвечает целям ресурсосбережения. ДКИН не способен устранить проскальзывание ленты относительно приводных барабанов в режиме пуска конвейера и колебания момента нагрузки при выходе на номинальную угловую скорость, так как данные особенности системы многодвигательного электропривода обусловлены характером механической нагрузки, а не формой кривой питающего напряжения.

2. ДКИН является эффективным средством повышения статической устойчивости системы электропривода ленточного конвейера. Граница статической устойчивости системы многодвигательного электропривода конвейера 2Л100У-01 по напряжению составляет 50% от номинального значения, но путём применения ДКИН при заданном уровне напряжения сети возможно обеспечить длительную и устойчивую работу привода, без изменения значений величин скорости и момента. Однако данный режим работы ДКИН, характеризующийся передачей на сторону нагрузки значительной мощности в течение длительного времени работы, возможен только при наличии резервной линии питания, что было обозначено ранее как одно из преимуществ выбора данной модификации.

3. Применение ДКИН улучшает динамическую устойчивость системы, что также основано на передаче недостающей мощности на сторону нагрузки. Минимальное время прерывания напряжения, при котором электропривод конвейера теряет устойчивость, равно 8 с, однако уже при 4-секундном прерывании напряжения режим самозапуска привода оказывается нежелательным, так как он сопровождается пробуксовкой ленты и 6-кратным превышением момента, что приводит к значительному износу оборудования. Использование ДКИН позволяет сохранить устойчивость системы по напряжению и скорости электропривода даже при длительных отключениях напряжения сети, при этом длительность устойчивой работы системы определяется только количеством имеющейся в резерве мощности.

Заключение (Conclusions)

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что применение устройства динамической компенсации искажений напряжения (ДКИН) является эффективным способом повышения устойчивости и надежности работы системы многодвигательного электропривода шахтной ленточной конвейерной установки. Выбранный методологический подход в виде компьютерного моделирования в среде MATLAB/Simulink® позволил выполнить сравнение режимов работы электротехнической системы с наличием и отсутствием устройства компенсации, и полученные результаты подтвердили технологическую эффективность применения выбранной модификации питания ДКИН от смежной линии. Внедрение данной модификации устройства ДКИН приводит к устранению значительного количества проблем, возникающих в системе электропривода ленточного конвейера как при кратковременных, так и при длительных искажениях напряжения подземной электрической сети. Это позволит избежать внеплановых отключений, аварий, простоев и снижений объемов транспортировки груза на угледобывающем предприятии, что приведет к значительной экономии денежных средств. Экономический эффект от внедрения устройства ДКИН на конкретном угледобывающем предприятии, в том числе срок его окупаемости, неоднозначен и в первую очередь зависит от величин внеплановых затрат, связанных с аварийными ситуациями, нарушениями технологического процесса транспортировки горной массы, изменением объемов добычи, преждевременной заменой или ремонтом оборудования.

Таким образом, внедрение ДКИН в существующие системы электроснабжения предприятий угледобывающего комплекса является перспективным решением для систем низковольтных многодвигательных электроприводов шахтных ленточных конвейеров.

При динамической компенсации искажений напряжения поддерживается номинальный и бесперебойный режим работы привода конвейера в условиях значительных нелинейных нагрузок на подземную электрическую сеть, приводящих к снижению качества передаваемой электрической энергии. Стабилизация работы ответственных участков конвейерного транспорта обеспечивает непрерывность технологического процесса добычи угля, что в свою очередь положительно сказывается на работе всей производственной инфраструктуры горнодобывающего предприятия. В долгосрочной перспективе внедрение устройств динамической компенсации искажений напряжения открывает новые возможности для повышения энергетической безопасности ответственных промышленных объектов и увеличения экономической эффективности предприятий, снижая наносимый искажениями сетевого напряжения ущерб технологическому процессу и электроприводному оборудованию.

Литература

1. Пляцанский Л.А., Решетняк С.Н., Решетняк М.Ю. Повышение качества электрической энергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт // Горные науки и технологии. 2022. Т. 7(1). С. 66-77. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-66-77
2. Романова В.В., Батухтин А.Г., Суслов К.В., Хромов С.В., Галятин В.А. Комплексная оценка факторов, воздействующих на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей угледобывающего комплекса // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 5. С. 3-18. DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-5-3-18.
3. Kolb A., Pazynich Y., Mirek A., Petinova O. Influence of voltage reserve on the parameters of parallel power active compensators in mining // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 201 (01024). 11 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202020101024
4. Сычев Ю.А., Аладьин М.Е., Зимин Р.Ю. Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства в комбинированных системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 7. С. 164–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_164
5. Sinyavsky O., Savchenko V., Liktey V., Bunko V. Influence of voltage unsymmetry on energy characteristics of belt conveyor // Energy and automation. 2022. № 4. 16 p. DOI: 10.31548/energiya2022.04.016.
6. Романова В.В., Хромов С.В., Батухтин А.Г., Суслов К.В. Анализ степени влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 4. С. 131-141. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-4-131-141.
7. Реутов А.А. ВЫБОР СХЕМЫ ПРИВОДОВ КОНВЕЙЕРА С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ // Транспортное машиностроение. 2024. №. 3. С. 31-40. DOI:10.30987/2782-5957-2024-3-31-40
8. Bajda M., Hardygóra M., Marasová D. Energy efficiency of conveyor belts in raw materials industry // Energies. 2022. Vol. 15. № 9 (3080). 6 p. DOI: 10.3390/en15093080
9. Зацепина В.И., Зацепин Е.П., Скоморохов П.И. Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения посредством комбинированного воздействия на искажения напряжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 5. С. 81-88. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-5-79-86
10. Федотов А.И., Кузнецов Р.В., Федотов Е.А., Леухин А.Н. Влияние ДКИН на качество электроэнергии при коротких замыканиях в питающих электрических сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2015. №. 3-4. С. 36-41. DOI: 10.30724/1998-9903-2015-0-3-4-36-41
11. Karuppannan A., Mohanaprasaath S. Design of Dynamic Voltage Restorer for Power Quality Improvement // Mediterranean Journal of Basic and Applied Sciences. 2024. Vol. 08. Issue 2. Pp. 54-62. DOI: 10.46382/MJBAS.2024.8205
12. Liu A., Wang Y., Zhu Y., Park S.-J. Research on power quality improvement system based on dynamic voltage restorer // IET Power Electron. 2024. Vol. 17. Pp. 1399–1410. DOI: 10.1049/pel2.12696
13. Abdelaal A.K., Shaheen A.M., El-Fergany A.A., Alqahtani M.H. Sliding mode control based Dynamic Voltage Restorer for Voltage Sag Compensation // Results in Engineering. 2024. Vol. 24 (102936). 12 p. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102936
14. Zahra S.T., Khan R.U., Ullah M.F., Begum B., Anwar N. Simulation-based analysis of dynamic voltage restorer with sliding mode controller at optimal voltage for power quality enhancement in distribution system // Electrical Engineering & Electromechanics. 2022. Vol. 1. Pp. 64-69. DOI: 10.20998/2074-272X.2022.1.09.
15. 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. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-3-12

16. Скопин Г.А. Исследование режимов работы динамического компенсатора искажений напряжения в системе электроснабжения нефтеперерабатывающего завода // Новые технологии в газовой промышленности: газ, нефть, энергетика: XIV Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов: тезисы докладов, Москва, 14–18 ноября 2022 года. Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2022. С. 669-670.

Авторы публикации

Дзюин Дмитрий Владленович – аспирант, ассистент кафедры Теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. ORCID*: <http://orcid.org/0009-0007-0411-9948>. Email: dzyuin.d@gubkin.ru

Скопин Георгий Андреевич – аспирант кафедры Теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. Email: asostrai@gmail.com

Комков Александр Николаевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой Теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-1010-6971>. Email: komkov.a@gubkin.ru

Дмитриева Валерия Валерьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры Теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-8740-9380>. Email: dm-valeriya@yandex.ru

References

1. Plashchansky LA, Reshetnyak SN, Reshetnyak MY. Improvement of electric energy quality in underground electric networks of highly productive coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022; 7(1):66–77. (In Russ). DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-66-77
2. Romanova VV, Batukhtin AG, Suslov KV, Khromov SV, Galyatin VA. Comprehensive assessment of factors affecting the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors of a coal mining complex. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26(5):3-18. (In Russ). DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-5-3-18
3. Kolb A, Pazynich Y, Mirek A, et al. Influence of voltage reserve on the parameters of parallel power active compensators in mining. *E3S Web of Conferences*. 2020; 201(01024):1-11. DOI: 10.1051/e3sconf/202020101024
4. Sychev YA, Aladin ME, Zimin RY. Multi-function filter compensation devices in composite power supply systems in mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022; 7:164-179. (In Russ). DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_164
5. Sinyavsky O, Savchenko V, Liktey V, et al. Influence of voltage unsymmetry on energy characteristics of belt conveyor. *Energy and automation*. 2022; 4:1-16. DOI: 10.31548/energiya2022.04.016
6. Romanova VV, Khromov SV, Batukhtin AG, Suslov KV. Analysis of the degree of influence of supply voltage asymmetry on the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24(4):131-141. (In Russ). DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-4-131-141
7. Reutov AA. CHOOSING THE CONVEYOR DRIVE LAYOUT TAKING INTO ACCOUNT UNCERTAIN OPERATING CONDITIONS. *Transport engineering*. 2024; (3):31-40. (In Russ). DOI: 10.30987/2782-5957-2024-3-31-40
8. Bajda M, Hardygóra M, Marasová D. Energy efficiency of conveyor belts in raw materials industry. *Energies*. 2022; 15(9):3080. DOI: 10.3390/en15093080
9. Zatsepina VI, Zatsepin EP, Skomorokhov PI. Improving the efficiency of power supply systems through the combined effect of voltage distortion. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(5):79-86. (In Russ). DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-5-79-86
10. Fedotov AI, Kuznetsov RV, Fedotov EA, Leuhin AN. Effect of dynamic compensators voltage distortion on the power quality during faults on the electrical networks. *Power engineering: research,*

equipment, technology. 2015; (3-4):36-41. (In Russ.) DOI: 10.30724/1998-9903-2015-0-3-4-36-41

11. Karuppannan A, Mohanaprasaath S. Design of Dynamic Voltage Restorer for Power Quality Improvement. *Mediterranean Journal of Basic and Applied Sciences*. 2024; 08(2):54-62. DOI: 10.46382/MJBAS.2024.8205

12. Liu A, Wang Y, Zhu Y, et al. Research on power quality improvement system based on dynamic voltage restorer. *IET Power Electron*. 2024; 17:1399–1410. DOI: 10.1049/pel2.12696

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. Zahra ST, Khan RU, Ullah MF, et al. Simulation-based analysis of dynamic voltage restorer with sliding mode controller at optimal voltage for power quality enhancement in distribution system. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2022; 1:64-69. DOI: 10.20998/2074-272X.2022.1.09

15. Dmitrieva VV, Dzyuin DV. Mathematical and computer model of a multi-mass multi-motor electric drive system of a belt conveyor. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2024; 2(172):3-12 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-3-12

16. Skopin GA. Issledovanie rezhimov raboty dinamicheskogo kompensatora iskazhenii napryazheniya v sisteme elektrosnabzheniya neftepererabatyvayushchego zavoda [Study of the operating modes of a dynamic voltage distortion compensator in the power supply system of an oil refinery]. *Novye tekhnologii v gazovoi promyshlennosti: gaz, nef't, energetika: XIV Vserossiiskaya konferentsiya molodykh uchenykh, spetsialistov i studentov: tezisy dokladov, Moskva, 14–18 noyabrya 2022 goda*. Moscow: Rossiiskii gosudarstvennyi universitet nef'ti i gaza (natsional'nyi issledovatel'skii universitet) imeni I.M. Gubkina [National University of Oil and Gas «Gubkin University»], 2022. Pp. 669-670. (In Russ.).

Authors of the publication

Dmitry V. Dzyuin – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0009-0007-0411-9948>. Email: dzyuin.d@gubkin.ru

Georgy A. Skopin – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. Email: asostraik@gmail.com

Aleksandr N. Komkov – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-1010-6971>. Email: komkov.a@gubkin.ru

Valeria V. Dmitrieva – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-8740-9380>. Email: dm-valeriya@yandex.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено 16.01.2025 г.

Отредактировано 28.01.2025 г.

Принято 20.02.2025 г.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОКРОГО ОДНОЗОННОГО ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА

Возмилов А.Г.¹, Урманов В.Г.², Панишев С.А.¹, Лисов А.А.¹

¹Южно-уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия

²Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, Россия

Panishef.serega@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* В условиях растущих требований к чистоте воздуха на промышленных предприятиях электрофилтраты приобретают особую значимость как эффективное средство удаления вредных частиц из воздушной среды. Вопросы их оптимизации остаются актуальными, поскольку от этого зависит уровень очистки и экономичность производственных процессов. *ЦЕЛЬ.* Проведение экспериментального исследования мокрого однозонного электрофилтрат и определение влияния конструктивных и режимных параметров на его эффективность. *МЕТОДЫ.* Для исследования был использован экспериментальный стенд с мокрым однозонным электрофилтратом, в котором изменялись ключевые параметры: напряжение питания, расстояние между электродами, радиус осадительных электродов и скорость воздушного потока. Эффективность работы филтрат оценивалась путем измерения концентрации частиц до и после очистки воздуха. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Эксперименты показали, что эффективность очистки воздуха снижается при увеличении скорости воздушного потока и межэлектродного расстояния, в то время как повышение напряжения и диаметра электродов улучшает качество очистки. Получены графические зависимости эффективности от изменяемых параметров, что позволило выявить оптимальные параметры. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Оптимизация параметров мокрого однозонного электрофилтрат способствует повышению эффективности очистки воздуха, что позволяет снизить вредные выбросы на производственных площадках и улучшить экологичность и экономичность производственных процессов.

Ключевые слова: очистка воздушной среды; электрофилтратация воздуха; эксперимент; оптимизация параметров.

Для цитирования: Возмилов А.Г., Урманов В.Г., Панишев С.А., Лисов А.А. Экспериментальные исследования мокрого однозонного электрофилтрат // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 63-75. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-63-75.

EXPERIMENTAL STUDIES OF A WET SINGLE-ZONE ELECTROFILTER

Vozmilov A.G.¹, Urmanov V.G.², Panishev S.A.¹, Lisov A.A.¹

¹South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia

²Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia

Panishef.serega@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* In the context of increasing requirements for air purity at industrial enterprises, electrostatic precipitators are of particular importance as an effective means of removing harmful particles from the air. The issues of their optimization remain relevant, since the level of purification and the cost-effectiveness of production processes depend on it. *THE PURPOSE.* To conduct an experimental study of a wet single-zone electrostatic precipitator and determine the influence of design and operating parameters on its efficiency. *METHODS.* The electrostatic precipitator under study differs from classic electrostatic precipitators in the design of the precipitating electrodes. The precipitating electrodes are made in the form of round, rotating disks, which are half immersed in liquid for continuous cleaning. For the study, an experimental stand with a wet single-zone electrostatic precipitator was used, in which the

key parameters were changed: supply voltage, distance between electrodes, radius of the precipitating electrodes and air flow velocity. The efficiency of the filter was estimated by measuring the concentration of particles before and after air purification. Each experiment was carried out for 20 minutes and repeated 5 times. **RESULTS.** Based on the test results, graphs were constructed of the dependence of the air purification efficiency of the electrostatic precipitator on the design and operating parameters. The experiments showed that the air purification efficiency decreases with an increase in the air flow rate and interelectrode distance, while an increase in the voltage and diameter of the electrodes improves the cleaning quality. Graphic dependences of the efficiency on the variable parameters were obtained, which made it possible to identify the optimal parameters. **CONCLUSION.** Optimization of the parameters of the wet single-zone electrostatic precipitator helps to increase the air purification efficiency, which allows to reduce harmful emissions at production sites and improve the environmental friendliness and cost-effectiveness of production processes.

Keywords: air purification; air electrofiltration; experiment; optimization of parameters.

For citation: Vozmilov A.G., Urmanov V.G., Panishev S.A., Lisov A.A. Experimental studies of a wet single-zone electrofilter. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (2): 63-75. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-63-75.

Введение (Introduction)

В современном промышленном производстве вопросы обеспечения чистоты воздушной среды на производственных площадках и предотвращения загрязнения окружающей среды становятся все более актуальными и приобретают повышенное значение с точки зрения экологических и социально-экономических аспектов [1].

Уменьшение загрязнения воздушной среды производственных помещений позволяет снизить количество заболеваний работников, поскольку загрязненный воздух может содержать пыль, химические вещества, газы, микроорганизмы, негативно влияющие на здоровье работников, вызывая аллергические реакции, респираторные заболевания, интоксикации и даже хронические болезни. Кроме того, недостаточная вентиляция может привести к накоплению токсичных или взрывоопасных веществ, создавая риск аварий. Повышенная концентрация пыли может также привести к загрязнению оборудования, увеличению его износа и даже поломкам [2].

Комфортные условия труда способствуют концентрации работников, снижению утомляемости, увеличению производительности труда и как следствие улучшение качества продукции. Не стоит забывать и про нормы и правила по качеству воздушной среды производственных помещений, несоблюдение требований которых может привести к штрафам, закрытию производства и репутационным потерям.

Достижение необходимого качества воздушной среды производственных помещений возможно с помощью системы вентиляции. Важнейшим элементом системы вентиляции является фильтр, от выбора которого зависит надежность и эффективность работы и качество воздушной среды.

Литературный обзор (Literature Review)

В научно-технической литературе предлагается множество различных фильтров для очистки воздушной среды помещений. Так в [3] предлагается использование механических фильтров. Механический фильтр обычно выполнен из мелкой сетки или ткани. Его достоинством является дешевизна, однако к недостаткам относится частая замена и не возможность улавливать мелкие частицы.

В [4] для обеззараживания воздушной среды предлагается ультрафиолетовая лампа. Однако она не удаляет аэрозольные частицы. Также автор отмечает, что механические фильтры дешевле, но требуют замену.

Простым и надежным решением для систем очистки воздушной среды является циклонный фильтр [5] он имеет простую конструкцию и низкую стоимость. Однако циклонный фильтр способен эффективно улавливать только крупные частицы, эффективность улавливания мелкодисперсной пыли у него низкая, кроме того, он обладает высоким аэродинамическим сопротивлением.

Автор [6] отмечает, что высокой эффективностью очистки от мелкодисперсной пыли обладают рукавные фильтры. К недостаткам же таких фильтров относится их высокая цена, сложность конструкции, необходимость регулярного обслуживания и замены рукавов [7].

Высокоэффективными и универсальными фильтрами для очистки воздушной среды являются скрубберы, говорит автор [8]. Они удаляют пыль, газы и химические пары, такие фильтры чаще всего используются на предприятиях химической промышленности. Недостатками являются высокая стоимость, сложность эксплуатации и необходимость большого количества воды.

Самыми эффективными фильтрами являются HEPA-фильтры и ULPA-фильтры [9]. Эффективность их очистки составляет до 99,97%, они задерживают мельчайшие частицы, бактерии и вирусы. К недостаткам таких фильтров относится высокая стоимость, частая замена и высокое сопротивление воздушному потоку. Применяются такие фильтры в основном в больницах, лабораториях, производстве электроники [10].

Перспективным аппаратом для очистки воздушной среды помещений является электрофильтр, отмечает автор [11]. Такие аппараты являются многозональными, эффективны от мелкой пыли и дыма, имеют низкие эксплуатационные затраты и низкое сопротивление воздушному потоку.

Анализ литературы показал, что наиболее эффективным, энерго- и ресурсозатратным аппаратом для очистки воздушной среды производственных помещений является электрофильтр. В данном контексте электрофильтры представляют собой важное технологическое решение для эффективной очистки воздуха от частиц пыли, дыма, газов и других вредных веществ [12].

Несмотря на широкое использование электрофильтров в промышленности, вопросы их оптимизации и совершенствования остаются актуальными. Экспериментальные исследования являются необходимым этапом в разработке и улучшении электрофильтров, поскольку позволяют оценить их эффективность, производительность и степень очистки воздуха [13, 14].

Главным выходным параметром электрофильтра является его эффективность очистки [15]. Эффективность очистки зависит от множества конструктивных и технологических параметров электрофильтра, которые необходимо учитывать на стадии проектирования, для достижения наиболее эффективной работы электрофильтра [16].

Так, авторы из [17] особое внимание уделяют коронирующим электродам, исследуя зависимость эффективности очистки от формы, расстояния между электродами и от их количества. Анализ показал, что наиболее эффективными являются электроды игольчатой формы [18].

Также на работу электрофильтра сказывается и полярность подводимого напряжения. Анализ [19] показал, что при отрицательной короне, пробой происходит при большем напряжении и эффективность очистки выше. При проектировании мокрого однозонного электрофильтра была выбрана отрицательная полярность питающего напряжения.

В работе [20] было затронуто влияние источника напряжения на эффективность очистки, однако это влияние достаточно мало и в данной работе затронуто не будет.

Наиболее сильное влияние на эффективность очистки электрофильтром оказывают такие конструктивные параметры как: длина зоны осаждения, количество осадительных электродов, расстояние между осадительными электродами, и технологические параметры такие как: скорость воздушного потока и величина питающего напряжения [21]. В текущем исследовании внимание будет обращено на данные технологические и конструктивные параметры.

Цель исследования заключается в проведении экспериментального исследования мокрого однозонного электрофильтра с последующим определением влияния различных параметров на эффективность его работы.

Научная значимость исследования состоит в получении новых аналитических зависимостей эффективности очистки воздуха мокрым однозонным электрофильтром от его конструктивных и режимных параметров.

Практическая значимость исследования заключается в определении оптимальных параметров работы электрофильтра (напряжение, скорость воздушного потока, расстояние между электродами и др.), что обеспечит более высокую степень улавливания аэрозольных частиц.

Материалы и методы (Materials and methods)

Объектом исследования является мокрый однозонный электрофильтр. На рисунке 1 представлена конструкция мокрого однозонного электрофильтра (МЭФ), разработанного на основе обширной технической литературы [22-26].

Конструкция включает корпус из коррозионностойких материалов, входной и выходной патрубки для поступления загрязненного газа и выхода очищенного,

электродную систему с коронирующими электродами для зарядки частиц и осадительными электродами для их осаждения, систему для смачивания осадительных электродов и сливную систему для удаления загрязненной жидкости, привод вращения вентилятора, привод вращения осадительных электродов, а также систему питания и управления для обеспечения работы устройства [27].

Отличительной особенностью данного фильтра является форма осадительных электродов. Осадительные электроды выполнены круглой формы, наполовину опущены в омывающую жидкость.

Принцип работы состоит в том, что загрязненный газ поступает внутрь, аэрозольные частицы заряжаются и оседают на электродах. Вращаясь, электроды проходят через жидкость, жидкость смывает осевшие частицы. Очищенный газ выходит наружу. Данное техническое решение позволяет непрерывно очищать электрофильтр, не давая ему загрязняться и сохранять высокую эффективность очистки на протяжении долгого времени. Мокрые электрофильтры эффективны для удаления мелкодисперсных частиц и аэрозолей и используются в различных промышленных отраслях [28].

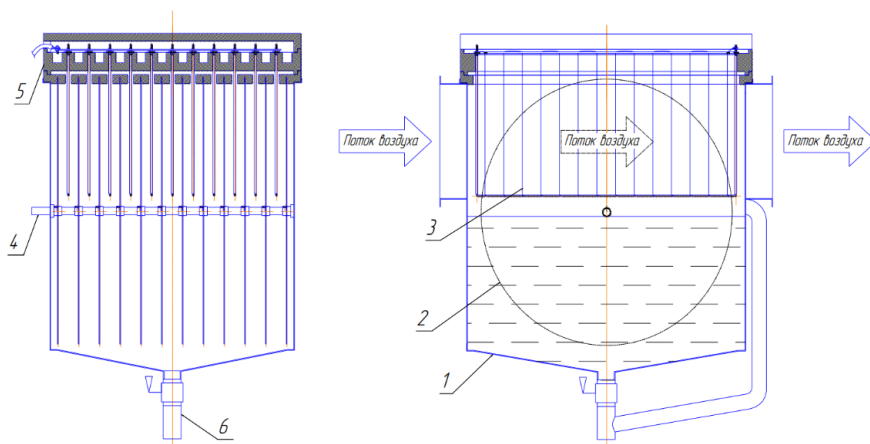


Рис. 1. Конструкция мокрого однозонного электрофильтра: 1 – корпус; 2 – осадительные электроды; 3 – коронирующие электроды; 4 – вал; 5 – изоляционная плита

Fig. 1. Construction of a wet single-zone electrostatic precipitator: 1 – housing; 2 – precipitation electrodes; 3 – corona electrodes; 4 – shaft; 5 – insulating plate

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

Изготовленный опытный образец мокрого однозонного электрофильтра (рис. 2) состоит из корпуса, выполненного из нержавеющей стали. Внутри корпуса расположены 14 круглых осадительных электродов диаметром 400 мм, толщина электрода – 3 мм, расстояние между осадительными электродами – 25 мм, между осадительными электродами расположены коронирующие электроды, выполненные в виде игольчатых стержней (рис. 3), глубина вхождения осадительного электрода в изоляционную плиту – 5 мм.



Рис. 2. Опытный образец МЭФ

Fig. 2. Prototype of a wet electrostatic precipitator

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

Экспериментальные исследования в лабораторных условиях производились в лабораториях кафедры «Применение электрической энергии в сельском хозяйстве» Южно-Уральского государственного аграрного университета (г. Челябинск).

Для проведения испытаний в лабораторных условиях использовался экспериментальный стенд (рис. 3), в основу которого был положен опытный образец мокрого однозонного электрофильтра.

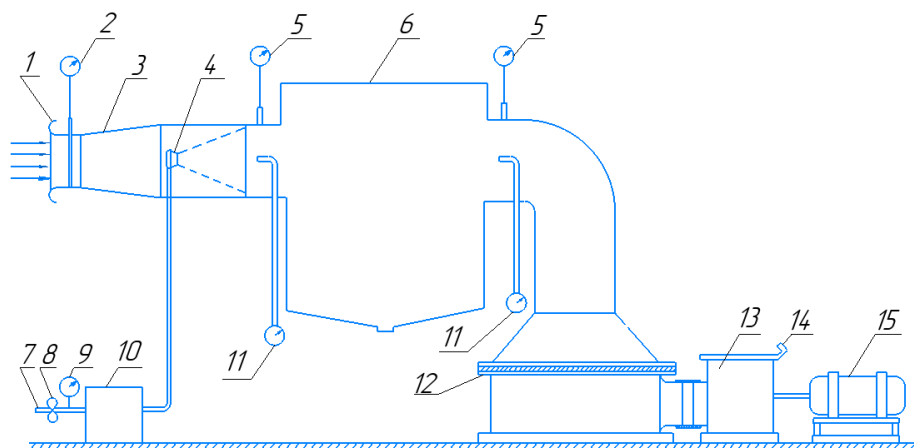


Рис. 3. Схема экспериментального стенда:

1 – Входной коллектор, 2 – Расходомер, 3 – Диффузор, 4 – Распылитель-диагломератор, 5 – Микроманометр, 6 – Испытываемый мокрый однозонный электрофильтр, 7 – Трубопровод сжатого воздуха, 8 – Вентиль, 9 – Манометр, 10 – Пыледозатор, 11 – Счетчик аэрозольных частиц, 12 – Абсолютный фильтр, 13 – Вентилятор, 14 – Шибер, 15 – Электродвигатель

Fig. 3. Diagram of the experimental stand:

1 – Inlet manifold, 2 – Flowmeter, 3 – Diffuser, 4 – Spray-diagglomerator, 5 – Micromanometer, 6 – Wet single-zone electrostatic precipitator under test, 7 – Compressed air pipeline, 8 – Valve, 9 – Pressure gauge, 10 – Dust dispenser, 11 – Aerosol counter particles, 12 – Absolute filter, 13 – Fan, 14 – Gate, 15 – Electric motor

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

Воздух втягивается в испытательный стенд из помещения при помощи вентилятора 13. Вентилятор с электродвигателем 15 монтируются на двух самостоятельных основаниях. Для исключения передачи вибрации от вентилятора к стенду в соединяющем их трубопроводе устанавливается эластичная вставка. Лопаточные колеса вентиляторов приводятся во вращение асинхронным электродвигателем и обеспечивают расход воздуха до 1000 м³/ч.

Заготовленная пыль подается через распылитель-диагломератор 4 на электрофильтр от пыледозатора 10 при помощи давления сжатого воздуха [29].

Для предотвращения попадания пыли из установки в помещение для проведения эксперимента, на выходе стенда установлен абсолютный фильтр 12.

В абсолютном фильтре ткань уложена на плоскую раму. В качестве фильтрующего материала в абсолютном фильтре используется материал ФПП-15.

Регулирование расхода воздуха в стендах осуществляется с помощью шиберы 14, установленного на выходе вентилятора [30].

Расход воздуха в стенде измеряется с помощью расходомера Метран-350-MFA на базе осредняющей напорной трубки ОНТ Annubar 485. Принцип действия расходомеров основан на измерении расхода среды методом переменного перепада давления.

Измерение концентрации пыли до и после фильтра измеряется при помощи счетчика 11 аэрозольных частиц Fluke 983.

В помещении стенда контролируются параметры воздушной среды: температура, давление, влажность и запыленность. Температура воздуха измеряется ртутным термометром, барометрическое давление – ртутным барометром, относительная влажность – аспирационным психрометром. Запыленность воздуха устанавливается анализатором пыли Атмас.

Проведение испытаний и оформление результатов

Испытание фильтров проводят путем очистки воздуха искусственно запыленного экспериментальной пылью. Воздух перед его запылением забирается из помещения.

Эффективность определяют на основе измерения количества пылевых частиц до и после испытываемого электрофильтра [31].

Для выявления влияния параметров электрофильтра на эффективность очистки, в ходе эксперимента изменялись такие параметры как напряжение питания, расстояние между осадительными электродами, радиус осадительных электродов, скорость воздушного потока [32].

Каждый эксперимент проводился в течение 20 минут, и повторялся 5 раз. Результаты экспериментов сводились в таблицу и обрабатывались с помощью статистических методов, для определения среднего значения, ошибки и определения эффективности очистки. Результаты эксперимента представляются в виде графиков зависимости эффективности очистки воздуха от изменяемого параметра электрофильтра.

На основе полученных данных формулируются выводы о ключевых параметрах, влияющих на эффективность работы электрофильтра, и даются рекомендации по улучшению конструкции и режима работы. Эти испытания помогают оптимизировать существующие модели и разрабатывать новые, более эффективные устройства для очистки газов в различных промышленных условиях.

Также были получены вольтамперные характеристики мокрого электрофильтра для определения максимального напряжения. Вольтамперные характеристики были сняты для сухого режима, когда в электрофильтр не была залита жидкость и для мокрого режима, когда электрофильтр был наполнен жидкостью. Осадительные электроды при этом были приведены во вращение. Вольтамперные характеристики были сняты для фильтра, с параметрами, описанными выше.

При снятии вольтамперных характеристик были использованы киловольтметр ТЕТРОН-KB20 и миллиамперметр СА3010/2-000.

Изменение напряжения было ступенчатое, с шагом 2 кВ, для каждого значения напряжения измерялся ток, протекающий через фильтр. Увеличение напряжения происходило до пробоя. По результатам измерений были построены графики зависимости тока коронного разряда от напряжения питания.

Результаты (Results)

Снятие вольтамперной характеристики

Результаты по снятию вольтамперной характеристики мокрого однозонного электрофильтра представлены на рисунке 4.

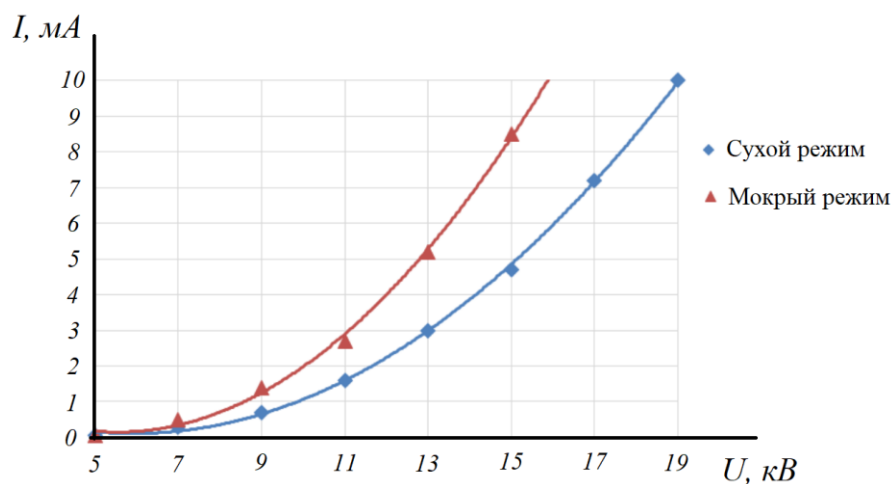


Рис. 4. Вольтамперная характеристика мокрого однозонного электрофильтра

Fig. 4. Voltage characteristic of a wet single-zone electrostatic precipitator

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

Анализ результатов сравнения показал, что вольтамперная характеристики электрофильтра, заполненного жидкостью круче. При равном напряжении, ток коронного разряда в мокром режиме больше. Это объясняется наличием мелкодисперсного жидкостного аэрозоля в межэлектродном промежутке, вследствие чего увеличивается влажность воздушного потока, что и приводит к повышению тока коронного разряда.

Пробой воздушного промежутка в мокром режиме наступает раньше, что также объясняется больше влажностью воздушного потока, по сравнению с сухим режимом. Пробой в сухом режиме для описанных параметров электрофильтра происходит при напряжении больше 19кВ, в сухом режиме, при напряжении больше 16кВ, это соответствует напряженности электрического поля 7,6 кВ/см и 6,4 кВ/см соответственно.

Таким образом для дальнейших испытаний мокрого однозонного электрофильтра

принято значение напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве, не более 6,4 кВ/см.

Исследование эффективности электрофильтра

Первая группа экспериментов направлена на определение зависимости эффективности работы электрофильтра от скорости воздушного потока для различных значений размеров аэрозольных частиц.

В таблице 1 представлена обработка результатов эксперимента для скорости воздушного потока 220 м³/ч и размера частицы 1 мкм. Аналогичным образом обработаны значения для скоростей воздушного потока 350, 420, 500, 600 и 700 м³/ч (табл. 2). По результатам построена зависимость эффективности электрофильтра от скорости воздушного потока для размеров аэрозольных частиц 1 мкм, 0,5 мкм и 0,3 мкм (рис. 5).

Таблица 1

Table 1

Результаты эксперимента
Experimental results

Номер опыта	Количество частиц перед фильтром, шт	Количество частиц после фильтра, шт	Эффективность фильтра
1	123648	241	0,998
2	113546	169	0,999
3	145862	208	0,999
4	135479	458	0,997
5	129746	542	0,996
		Среднее значение	0,998
		Погрешность	0,1%

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

Таблица 2

Table 2

Результаты эксперимента
Experimental results

Скорость воздушного потока, м ³ /ч	Эффективность фильтра	Погрешность, %
220	0,998	0,1
350	0,990	0,17
420	0,979	0,13
500	0,970	0,2
600	0,937	0,6
700	0,870	0,9

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

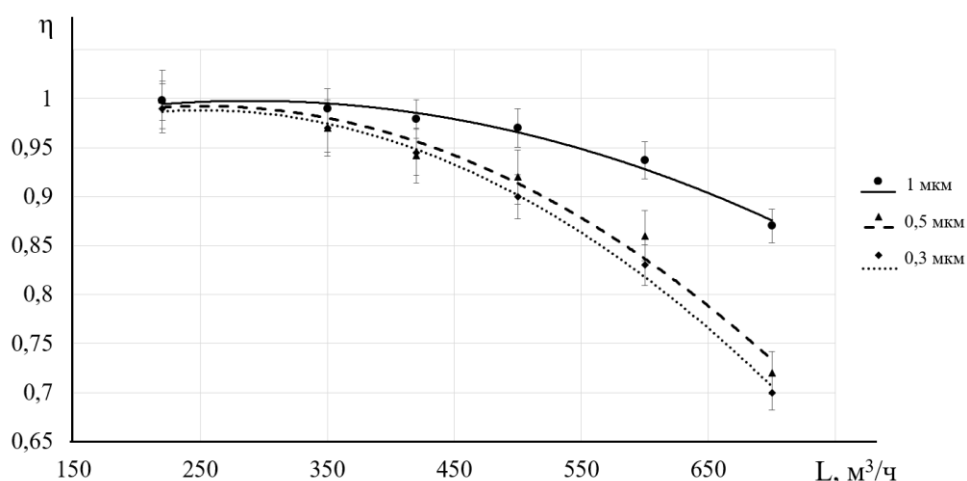


Рис. 5. Экспериментальные зависимости эффективности электрофильтра от скорости воздушного потока для аэрозольных частиц размеров 1 мкм, 0,5 мкм и 0,3 мкм

Fig. 5. Experimental dependences of the efficiency of the electrostatic precipitator on the air flow velocity for aerosol particles of sizes 1 microns, 0.5 microns and 0.3 microns

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

Второй группой экспериментов была направлена на определение зависимости эффективности электрофильтра от напряжения питания. Результат эксперимента

представлена на рисунке 6.

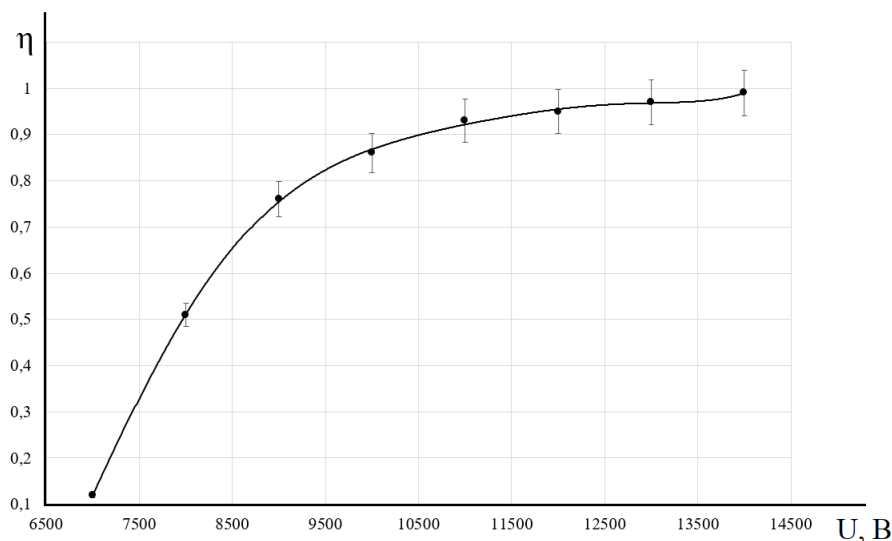


Рис. 6. Экспериментальная зависимость эффективности электрофильтра от напряжения питания

Fig. 6. Experimental dependence of the efficiency of the electrostatic precipitator on the supply voltage

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

Третья группа экспериментов была направлена на определение влияния расстояния между осадительными электродами на эффективность электрофильтра. Сняты экспериментальные зависимости эффективности электрофильтра от скорости воздушного потока для межэлектродных расстояний 0,025 м, 0,03 м, 0,035 м и 0,04 м. Результаты представлены на рисунке 7.

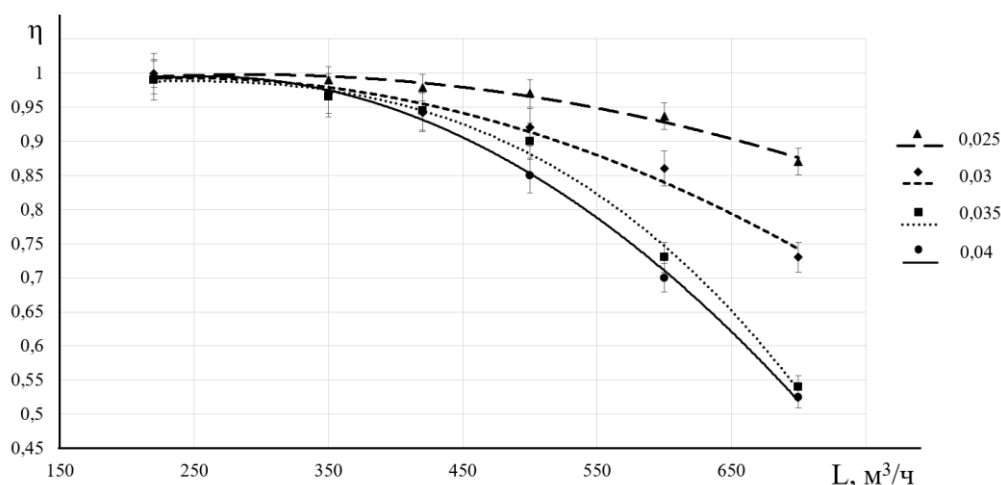


Рис. 7. Экспериментальная зависимость эффективности электрофильтра от скорости воздушного потока для межэлектродных расстояний 0,025 м, 0,03 м, 0,035 м и 0,04 м

Fig. 7. Experimental dependence of the efficiency of the electrostatic precipitator on the air flow velocity for interelectrode distances of 0.025 m, 0.03 m, 0.035 m and 0.04 m

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

Четвертая группа экспериментов была направлена на выявление влияния радиуса осадительных электродов на эффективность электрофильтра. Были изготовлены осадительные электроды радиусом 0,2 м, 0,3 м, 0,4 м и 0,5 м. Для каждой группы осадительных электродов были сняты зависимости эффективности электрофильтра от скорости воздушного потока. Результаты эксперимента представлены на рисунке 8.

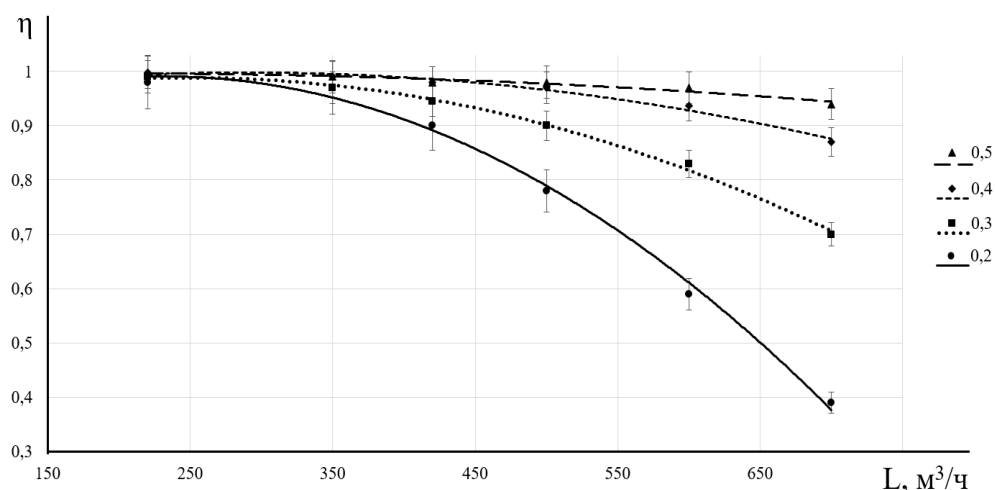


Рис. 8. Экспериментальная зависимость эффективности электрофильтра от скорости воздушного потока при осадительных электродах радиусом 0,2 м, 0,3 м, 0,4 м и 0,5 м

Fig. 8. Experimental dependence of the efficiency of the electrostatic precipitator on the air flow velocity at precipitation electrodes with a radius of 0.2 m, 0.3 m, 0.4 m and 0.5 m

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

Обсуждение (Discussions)

Анализ экспериментальных зависимостей показал, что:

- при увеличении скорости воздушного потока, эффективность улавливания аэрозольных частиц мокрым однозонным электрофильтром уменьшается, что объясняется вторичным уносом частиц аэрозоля потоком воздуха;
- эффективность очистки для разных размеров аэрозольных частиц отличается. Чем меньше размер частиц, тем эффективность меньше, что свидетельствует об уменьшении действия силы Кулона на осадительную частицу меньшего диаметра из-за меньшего ее заряда;
- эффективность очистки мокрым электрофильтром тем ниже, чем ниже напряжение питания, что объясняется уменьшением мощности коронного разряда и, соответственно, уменьшению заряда частиц аэрозоля;
- эффективность очистки мокрым электрофильтром зависит от расстояния между осадительными электродами. Чем больше расстояние между осадительными электродами, тем меньше эффективность электрофильтра, что объясняется снижением напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке;
- эффективность очистки мокрым электрофильтром зависит от диаметра осадительных электродов. Чем меньше диаметр осадительных электродов, тем меньше эффективность электрофильтра, что объясняется уменьшением площади осаждения электрофильтра.

Заключение (Conclusions)

Экспериментальные исследования позволяют получить зависимости эффективности мокрого однозонного электрофильтра от конструктивных и технологических параметров.

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить степень влияния параметров мокрого однозонного электрофильтра на эффективность его работы. Результаты показали, что увеличение скорости воздушного потока и расстояния между электродами снижает эффективность очистки, в то время как увеличение напряжения и диаметра осадительных электродов способствует более эффективному улавливанию частиц.

Полученные зависимости позволяют получить оптимальные параметры электрофильтра для его наиболее эффективной работы, что обеспечит повышение экологичности и экономичности промышленного производства.

Литература

1. Чикляев Е.Г., Танеева А.В., Коротаев О.Р. Проблемы экологической безопасности воздушной среды промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2010. № 3-4. С. 122-130.
2. Преображенский Ю.П. О проблемах качества воздушной среды и загрязнении атмосферы

- // Инновационные методы проектирования строительных конструкций зданий и сооружений. 2020. С. 219-222.
3. Бородина М. А., Кича М. А., Михайленко В. С. Очистка воздушной среды от жидких и твердых аэрозолей с использованием фильтра УОВ-ФА // Вестник МАНЭБ. 2023. Т. 28. №. 1. С. 28.
4. Данышова А. С. Обеззараживание воздуха в вентиляционных системах // Научный аспект. 2024. №6. С. 7149-7155.
5. Мальчик А.Г., Тишук А.А., Романюк Р.А. Запыленность воздушной среды деревообрабатывающих цехов. Способы снижения концентрации пыли в воздухе рабочей зоны // Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции, 25–27 мая 2023 г., Юрга. Томский политехнический университет, С. 177-180.
6. Mata T.M., Martins A.A., Calheiros C.S., et al. Indoor air quality: a review of cleaning technologies // *Environments*. 2022. Т. 9. №. 9. С. 118.
7. Swamy G. Development of an indoor air purification system to improve ventilation and air quality // *Heliyon*. 2021. Т. 7. №. 10.
8. Базыкин В.И. Способы снижения выбросов климатически активных газов на свинофермах // *АгроЭкоИнженерия*. 2023. №. 4 (117). С. 113-129.
9. Гулай Е. С., Зарипов Р. И. Роль высокоэффективных фильтров в жизнеобеспечении // *Актуальные научные исследования от теории к практике: сборник материалов международной научно-практической конференции, 19 января 2024 г., Москва*. Т2. С. 75.
10. Dubey S., Rohra H., Taneja A. Assessing effectiveness of air purifiers (HEPA) for controlling indoor particulate pollution // *Heliyon*. 2021. Т. 7. №. 9.
11. Viner A. S. et al. Air cleaners for indoor air pollution control // *Indoor Air Pollution*. – CRC Press, 2021. – С. 115-131.
12. Возмилов А.Г., Илимбетов Р.Ю., Панишев С.А., и др. Анализ электрофильтров для очистки воздушной среды производственных помещений // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2024. Т. 26. №. 2. С. 78-96.
13. Chen L., Gonze E., Ondarts M., et al. Electrostatic precipitator for fine and ultrafine particle removal from indoor air environments // *Separation and Purification Technology*. 2020. Т. 247. С. 116964.
14. Pal A., Dixit A., Srivastava A.K. Design and optimization of the shape of electrostatic precipitator system // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Т. 47. С. 3871-3876.
15. Lee G.H., Hwang S.Y., Cheon T.W., et al. Optimization of pipe-and-spike discharge electrode shape for improving electrostatic precipitator collection efficiency // *Powder Technology*. 2021. Т. 379. С. 241-250.
16. Wang P. Liu J., Wang C., et al. A holistic performance assessment of duct-type electrostatic precipitators // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Т. 357. С. 131997.
17. Andrade R.G., Guerra V.G. Discharge electrode influence on electrostatic precipitation of nanoparticles // *Powder Technology*. 2021. Т. 379. С. 417-427.
18. Wang X. Effects of corona wire distribution on characteristics of electrostatic precipitator // *Powder Technology*. 2020. Т. 366. Р. 36-42.
19. Шавкунов М. Л., Корепанов А. С., Лекомцев П. Л. Исследование влияния полярности коронного разряда на работу электрофильтра // *Научные разработки и инновации в решении стратегических задач агропромышленного комплекса*. 2022. С. 304-308.
20. Пархомчук Г. Е. Исследование влияния выходных параметров источников высокого напряжения на параметры электрофильтров // *Актуальные вопросы современной науки и образования*. 2024. С. 20.
21. Селезнева Д. М. Проведение испытаний многозонного электрофильтра для обеспыливания воздуха сельскохозяйственных помещений // *Агротехника и энергообеспечение*. 2021. №. 2 (31). С. 12-17.
22. Катин В. Д., Журавлев А. А. Разработка новой конструкции высокоэффективного циклона-электрофильтра для угольных котельных // *Развитие современной науки и технологий в условиях трансформационных процессов*. 2022. С. 60-64.
23. Слободскова А.А., Белименко С.О., Суслов И.А., и др. К вопросу эффективности мокрого электрофильтра при очистке воздуха // *Эффективность применения инновационных технологий и техники в сельском и водном хозяйстве*. 2020. С. 411-413.
24. Badami M. M. et al. Design, optimization, and evaluation of a wet electrostatic precipitator (ESP) for aerosol collection // *Atmospheric Environment*. – 2023. – Т. 308. – С. 119858.
25. Lee H., Tohidi R., Aldekheel M., et al. Development of electrostatic-precipitator-type air conditioner for reduction of fine particulate matter in subway // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2022. Т. 58. №. 3. С. 3992-3998.
26. Knight R.M., Hocter J.S., Milliken S.R., et al. Development and optimisation of full-scale

prototype electrostatic precipitators in a laboratory for particulate matter mitigation in poultry facilities // Biosystems Engineering. 2023. Т. 230. С. 71-82.

27. Юркин В.В., Илимбетов Р.Ю., Дмитриев А.А., и др. К вопросу расчета конструкционных параметров мокрого электрофильтра // АгроЭкоИнфо. 2023. № 5 (59).

28. Возмилов А.Г., Андреев Л.Н., Панишев С.А., и др. Использование двухступенчатого мокрого электрофильтра в системах очистки рециркуляционного воздуха в производственных помещениях сельского хозяйства с целью снижения заболеваемости рабочих // Вестник НГИЭИ. 2022. № 5 (132). С. 45-54.

29. Красилова В.А., Коссович Е.Л., Гаврилова Д.И., и др. Лабораторная установка для улавливания и концентрирования взвешенной угольной пыли // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 6. С. 121-130.

30. Zhu Y., Chen C., Shi J., et al. Experimental investigation of the effect of collection length in a two-stage electrostatic precipitator for removal of PM_{2.5} // Chemical Engineering Journal. 2021. Т. 421. С. 127797.

31. Chen L., Gonze E., Ondarts M., et al. Electrostatic precipitator for fine and ultrafine particle removal from indoor air environments // Separation and Purification Technology. 2020. Т. 247. С. 116964.

32. Zhou W., Jiang R., Sun Y., et al. Study on multi-physical field characteristics of electrostatic precipitator with different collecting electrodes // Powder Technology. 2021. Т. 381. С. 412-420.

Авторы публикации

Возмилов Александр Григорьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-уральского государственного университета (НИУ), г. Челябинск, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1292-3975>. vozmiag@rambler.ru

Урманов Виль Губаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Прикладная механика и компьютерный инжиниринг» Башкирского государственного аграрного университета, г. Уфа, Россия. ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-8328-0392>. uv95@mail.ru

Панишев Сергей Алексеевич – аспирант кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-уральского государственного университета (НИУ), г. Челябинск, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2753-2341>. panishef.serega@mail.ru

Лисов Андрей Анатольевич – аспирант кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-уральского государственного университета (НИУ), г. Челябинск, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7282-8470>. lisov.andrey2013@yandex.ru

References

1. Chiklyaev E.G., Taneeva A.V., Korotaev O.R. Problems of environmental safety of the air environment of industrial enterprises // News of higher educational institutions. Energy problems. 2010. No. 3-4. pp. 122-130.

2. Preobrazhensky Yu.P. On the problems of air quality and atmospheric pollution // Innovative methods of designing building structures of buildings and structures. 2020. pp. 219-222.

3. Borodina M. A., Kicha M. A., Mikhailenko V. S. Purification of the air environment from liquid and solid aerosols using a UV-FA filter // Bulletin of MANEB. 2023. Vol. 28. No. 1. p. 28.

4. Danshova A. S. Disinfection of air in ventilation systems // Scientific aspect. 2024. No. 6. pp. 7149-7155.

5. Boy A.G., Tishchuk A.A., Romanyuk R.A. Dustiness of the air environment of woodworking shops. Ways to reduce the concentration of dust in the air of the working area // Innovative technologies in mechanical engineering: proceedings of the XIV Scientific and Practical International Conference, May 25-27, 2023, Jurga. Tomsk Polytechnic University, pp. 177-180.

6. Mata T.M., Martins A.A., Calheiros K.S. and others. Indoor air quality: an overview of cleaning technologies // Environment. 2022. Vol. 9. No. 9. p. 118.

7. Swami G. Development of an indoor air purification system to improve ventilation and air quality. 2021. Vol. 7. No. 10.

8. Bazykin V.I. Ways to reduce emissions of climatically active gases on pig farms // Agroecoengineering. 2023. No. 4 (117). pp. 113-129.

9. Gulai E. S., Zaripov R. I. The role of high-efficiency filters in life support // Current scientific

research from theory to practice: proceedings of the International Scientific and practical Conference, January 19, 2024, Moscow. T2. P. 75.

10. Dubey S., Rora H., Taneya A. Evaluation of the effectiveness of air purifiers (HEPA) for the control of indoor pollution by solid particles // *Heliyon*. 2021. Vol. 7. No. 9.

11. Viner A. S. and others. Air purifiers to combat indoor air pollution // *Indoor air pollution*. – CRC Press, 2021. – pp. 115-131.

12. Vozdilov A.G., Ilimbetov R.Yu., Panishev S.A., and others. Analysis of electrostatic precipitators for air purification of industrial premises // *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2024. Vol. 26. No. 2. pp. 78-96.

13. Chen L., Gonze E., Ondarts M. et al. An electrofilter for removing fine and ultrafine particles from indoor air // *Separation and purification technology*. 2020. Vol. 247. pp. 116964.

14. Pal A., Dixit A., Srivastava A.K. Design and optimization of the shape of the electrostatic precipitator system // *Materials today: Proceedings*. 2021. Vol. 47. pp. 3871-3876.

15. Lee G.H., Hwang S.Y., Cheon T.V. and others. Optimization of the shape of the tubular discharge electrode to increase the efficiency of collecting the electrostatic precipitator // *Powder technologies*. 2021. Vol. 379. pp. 241-250.

16. Wang P., Liu J., Wang S. et al. Comprehensive assessment of the effectiveness of channel electrostatic precipitators // *Journal of environmentally friendly production*. 2022. Vol. 357. pp. 131997.

17. Andrade R.G., Guerra V.G. The effect of a discharge electrode on the electrostatic deposition of nanoparticles // *Powder technology*. 2021. Vol. 379. pp. 417-427.

18. Wang H. The effect of corona discharge propagation on the characteristics of an electrofilter // *Powder technology*. 2020. Vol. 366. pp. 36-42.

19. Shavkunov M. L., Korepanov A. S., Lekomtsev P. L. Investigation of the effect of corona discharge polarity on the operation of an electrofilter // *Scientific developments and innovations in solving strategic tasks of the agro-industrial complex*. 2022. pp. 304-308.

20. Parkhomchuk G. E. Investigation of the influence of output parameters of high voltage sources on the parameters of electrostatic precipitators // *Actual issues of modern science and education*. 2024. p. 20.

21. Selezneva D. M. Conducting tests of a multi-zone electrostatic precipitator for dedusting the air of agricultural premises // *Agrotechnics and energy supply*. 2021. No. 2 (31). pp. 12-17.

22. Katin V. D., Zhuravlev A. A. Development of a new design of a highly efficient cyclone-electric filter for coal-fired boilers // *Development of modern science and technology in conditions of transformation processes*. 2022. pp. 60-64.

23. Slobodskova A.A., Belimenko S.O., Suslov I.A., and others. On the issue of the effectiveness of a wet electrostatic precipitator in air purification // *The effectiveness of the use of innovative technologies and equipment in agriculture and water management*. 2020. pp. 411-413.

24. Badami M. M. et al. Design, optimization and evaluation of a wet electrostatic precipitator (ESP) for aerosol collection // *Atmospheric environment*. – 2023. – Vol. 308. – p. 119858.

25. Lee H., Tohidi R., Aldehil M. et al. Development of an air conditioner with an electrostatic precipitator to reduce the content of fine solid particles in the subway // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2022. Vol. 58. No. 3. pp. 3992-3998.

26. Knight R.M., Hoche J.S., Milliken S.R. et al. Development and optimization of full-scale prototypes of electrostatic precipitators in the laboratory to reduce the content of solid particles in poultry farms // *Biosystem Engineering*. 2023. Vol. 230. pp. 71-82.

27. Yurkin V.V., Ilimbetov R.Yu., Dmitriev A.A., and others. On the issue of calculating the structural parameters of a wet electrofilter // *AgroEcoInfo*. 2023. № 5 (59).

28. Vozdilov A.G., Andreev L.N., Panishev S.A., and others. The use of a two-stage wet electrostatic precipitator in recirculating air purification systems in agricultural production facilities in order to reduce the incidence of workers // *Bulletin of the NGIEI*. 2022. № 5 (132). Pp. 45-54.

29. Krasilova V.A., Kossovich E.L., Gavrilova D.I., and others. Laboratory installation for the capture and concentration of suspended coal dust // *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2022. No. 6. pp. 121-130.

30. Zhu Yu., Chen K., Shi J. and others. An experimental study of the effect of the collection length in a two-stage electrostatic precipitator on the removal of PM_{2.5} // *Journal of Chemical Engineering*. 2021. Vol. 421. p. 127797.

31. Chen L., Gonze E., Ondarts M. et al. An electrofilter for removing fine and ultrafine particles from indoor air // *Separation and purification technology*. 2020. Vol. 247. pp. 116964.

32. Zhou W., Jiang R., Sun Yu. and others. Investigation of the characteristics of the multiphysical field of an electrofilter with various collecting electrodes // *Powder technology*. 2021. Vol. 381. pp. 412-420.

Authors of the publication

Alexander G. Vozmilov – South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1292-3975>. vozmiag@rambler.ru

Vil G. Urmanov – Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8328-0392>. uv55@mail.ru

Sergey A. Panishev – South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2753-2341>. panishef.serega@mail.ru

Andrey A. Lisov – South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7282-8470>. lisov.andrey2013@yandex.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено 07.02.2025 г.

Отредактировано 28.02.2025 г.

Принято 01.03.2025 г.



СУММИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ ЖИЛОГО КОМПЛЕКСА

Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Федотов Е.А., Кулаков В.Н.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
ahmetshin.ar@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в совершенствовании нормативной базы, регламентирующей порядок определения расчетной нагрузки при суммировании жилых и общественных зданий жилых комплексов. ЦЕЛЬ. Выполнить анализ графиков электрических нагрузок трансформаторных подстанций, питающих смешанную нагрузку: многоквартирные дома, дошкольные образовательные учреждения и средние образовательные школы в различные периоды времени года, дней недели, времени суток с последующей разработкой предложений по актуализации СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» в части методики определения суммарной нагрузки жилых и общественных зданий жилого комплекса. МЕТОДЫ. При выполнении поставленной цели были использованы экспериментальные, математические и статистические методы. РЕЗУЛЬТАТЫ. Выполненный анализ графиков нагрузки позволил определить временные периоды максимумов нагрузок трансформаторных подстанций, питающих смешанную нагрузку. Результаты проведенного анализа будут использованы при актуализации коэффициентов одновременности и несовпадения максимумов для суммирования смешанной нагрузки на трансформаторной подстанции. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Максимальная нагрузка трансформаторных подстанций, питающих только многоквартирные дома, приходится на вечерние часы выходных дней зимнего периода (в рабочие дни нагрузка ниже). Напротив, максимальные нагрузки трансформаторных подстанций, питающих многоквартирные дома и дошкольные образовательные учреждения, а также многоквартирные дома и средние образовательные школы, приходятся на рабочие дни. Расчетная нагрузка таких трансформаторных подстанций должна суммироваться с нагрузкой многоквартирных домов в рабочие дни с учетом дневного максимума нагрузки образовательных учреждений, для чего необходимо предусмотреть корректирующий коэффициент.

Ключевые слова: электрические нагрузки; коэффициент одновременности; коэффициент несовпадения максимумов; график нагрузки; проектирование систем электроснабжения.

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Для цитирования: Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Федотов Е.А., Кулаков В.Н. Суммирование электрических нагрузок жилых и общественных зданий жилого комплекса // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 76-89. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-76-89.

SUMMATION OF ELECTRICAL LOADS OF RESIDENTIAL AND PUBLIC BUILDINGS OF A RESIDENTIAL COMPLEX

Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., Fedotov E.A., Kulakov V.N.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
ahmetshin.ar@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The aim of the research is to improve the regulatory framework governing the procedure for determining the estimated load when summing up residential and public buildings of residential complexes. *THE PURPOSE.* To analyze the graphs of electrical loads of transformer substations supplying a mixed load: apartment buildings, preschool educational institutions and secondary schools at different times of the year, days of the week, times of day, with subsequent development of proposals for updating SP 256.1325800.2016 "Electrical installations of residential and public buildings. Design and installation rules" in terms of the methodology for determining the total load of residential and public buildings of a residential complex. *METHODS.* In achieving the set goal, experimental, mathematical and statistical methods were used. *RESULTS.* The performed analysis of the load graphs allowed us to determine the time periods of maximum loads of transformer substations feeding a mixed load. The results of the analysis will be used to update the coefficients of simultaneity and non-coincidence of maximums for summing up the mixed load at the transformer substation. *CONCLUSION.* The maximum load of transformer substations feeding only apartment buildings falls on the evening hours of weekends in the winter period (the load is lower on weekdays). On the contrary, the maximum loads of transformer substations feeding apartment buildings and preschool educational institutions, as well as apartment buildings and secondary schools, fall on weekdays. The estimated load of such transformer substations should be summed up with the load of apartment buildings on weekdays, taking into account the daily maximum load of educational institutions, for which it is necessary to provide a correction factor.

Keywords: *electrical loads; simultaneity factor; maximum non-coincidence factor; load schedule; design of power supply systems.*

Acknowledgments: *The work was carried out with the support of a grant from the Tatarstan Academy of Sciences, provided to young candidates of science (postdoctoral researchers) for the purpose of defending a doctoral dissertation, conducting scientific research, as well as performing job functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan "Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan".*

For citation: Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., Fedotov E.A., Kulakov V.N. Summation of electrical loads of residential and public buildings of a residential complex. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (2): 76-89. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-76-89.

Введение (Introduction)

Пересмотр нормативных документов, направленных на совершенствование проектирования систем городского электроснабжения, делает актуальным анализ используемых в настоящее время методов расчета электрических нагрузок, от чего зависят количество и мощность трансформаторных подстанций (ТП), сечения питающих кабелей, а также расчетная мощность технологического присоединения [1-6].

Использование устаревших нормативных значений в жилищном строительстве привело к тому, что ТП загружены в среднем не более, чем на 45% [1-6]. Решение задачи по пересмотру нормативных документов приведет к оптимальной загрузке ТП, что, с одной стороны, сократит «запертую электрическую мощность», вследствие чего уменьшатся потери электроэнергии [7-9], а с другой стороны, снизит затраты на технологическое присоединение [1-3].

В настоящее время активизируются процессы обновления или же полного пересмотра тех нормативных документов, которые использовались при проектировании электротехнических объектов многие десятилетия [1-6, 10-17].

Совершенствование проектирования направлено на реализацию принципов параметрического метода нормирования, которое предполагает на верхнем уровне задание базовых условий, а на более низких уровнях уже представление проектировщикам возможностей выбора, оставаясь в рамках жестких ограничений по безопасности, допустимым токовым нагрузкам, надежности и т.п., тех технических решений, которые наиболее подходят для конкретных условий. Применение параметрического метода нормирования способствует внедрению в системах электроснабжения жилых зданий альтернативных решений таких, как применение

накопителей электроэнергии, позволяющих обеспечить снижение расчетной присоединяемой нагрузки [18, 19], распределенной генерации [19, 20] и интеллектуальной электрической сети с элементами гексагональной структуры [21-24] и т.п.

Оценка современного состояния научно-технической проблемы несоответствия расчетных электрических нагрузок групп потребителей жилого микрорайона на шинах ТП и распределительных пунктов их фактическим значениям показывает недостаточное методическое обеспечение в соответствующих нормативных документах. При суммировании расчетной нагрузки каждого из групп потребителей необходимо учитывать неодновременность их максимумов нагрузки [25, 26]. В тоже время коэффициенты одновременности максимумов нагрузки не обновлялись более 25 лет и не учитывают изменившийся состав электроприемников. Цель и задачи работы состоят в анализе выполненных измерений электрических нагрузок многоквартирных домов (МКД) и дополнении их результатами измерений электрических нагрузок дошкольных образовательных учреждений (ДОУ) и средних образовательных школ (СОШ); в статистической обработке используемых электрических нагрузок в составе разнородных групп жилого комплекса; в анализе состава нежилых помещений обследованных МКД; в разработке предложений по изменениям и дополнениям ранее утвержденных сводов правил в виде методики расчета суммарной нагрузки в целом по жилому комплексу.

В представленном исследовании выполнен анализ электропотребления ТП с разным составом нагрузок, а также анализ пиковых нагрузок, что обеспечит в дальнейшем расчет необходимых коэффициентов суммирования расчетных нагрузок рассматриваемых объектов. Для исследования графиков нагрузки ТП была сформирована выборочная совокупность ТП г. Москвы и Московской области.

Литературный обзор (Literature Review)

В статье [1] представлено исследование городских ТП 10/0,4 кВ в различных регионах Российской Федерации, и показано, что более 70% трансформаторов в течение года загружены менее, чем на 30% от номинальной мощности. Анализ фактических суточных графиков электрических нагрузок МКД Республики Татарстан (РТ) за 2016-2018 гг. с последующей статистической обработкой позволил обосновать необходимость снижения расчетной электрической нагрузки при проектировании МКД и разработать новые региональные нормативы удельных расчетных нагрузок. На примере жилого комплекса «Салават Купере» показана экономическая эффективность применения новых нормативов для РТ при расчетах электрических нагрузок и выборе электрооборудования.

Исследования электрических нагрузок на примере г. Москвы, представленные в [2], показали, что можно оперировать не только отдельными квартирами, что усложняет измерения, но и их группами, включая и общедомовую нагрузку, что существенно упрощает расчёты по выбору элементов внешней системы электроснабжения МКД, включая питающие ТП. Измерения потребляемой электроэнергии каждой квартиры МКД на интервалах наблюдения дали возможность исключить неэксплуатируемые квартиры, что позволяет более точно рассчитывать удельные электрические нагрузки квартир по данным фактических измерений. Показано, что нормативные значения удельных электрических нагрузок завышены, в том числе при учёте общедомовой и коммерческой нагрузки [5]. На основании статистической обработки удельной электрической нагрузки квартир МКД Московской области кластера 11-18 этажей разработаны изменения в нормативно-технический документ в части актуализации удельных расчетных электрических нагрузок квартир МКД Московской области кластера 11-18 этажей. Проведенные в 2021-2022 гг. масштабные измерения электрических нагрузок МКД Москвы и Московской области [6] позволили привести анализ и статистическую обработку по обоснованию предложения по объединению Москвы и Московской области в единую агломерацию при нормировании удельных электрических нагрузок.

В статье [3] приводится необходимость разработки нормативных документов по удельным электрическим нагрузкам для объектов индивидуального жилищного строительства (ОИЖС). По результатам анализа летних и зимних нагрузок ОИЖС установлено, что средние электрические нагрузки для объектов индивидуального жилищного строительства в сельской местности выше, чем в городской черте. Полученные графики удельных расчетных электрических нагрузок и коэффициентов одновременности позволят разработать нормативный документ для проектирования электрических сетей коттеджных поселков.

В [4] проанализированы суточные графики МКД, ДОУ и СОШ в рабочие и выходные дни и выполнена оценка временных интервалов набора и сброса нагрузки для использования при выборе параметров электрозарядных станций.

Проблема повышения точности расчёта электрических нагрузок МКД с квартирами, оснащёнными электроплитами, рассматривается в [10]. Предлагаются новые методики определения электрических нагрузок квартир с электрическими плитами МКД.

Корректировка удельных электрических нагрузок квартир в нормативных документах по результатам обследования электрических нагрузок МКД с электроплитами в Московском регионе за период с 2012 по 2021 г. представлена в [11].

В [12] исследована возможность учета взаимной корреляции индивидуальных графиков электрической нагрузки МКД с помощью их некоррелированных компонентных моделей и применения для оценки суммарного вклада в дисперсию суммарного графика электрической нагрузки.

По экспериментальному графику нагрузки МКД выполнен анализ зависимости погрешности определения расчетной электрической нагрузки по нагреву от длительности интервала измерений с помощью счетчиков электроэнергии [13]. Показано, что с практической точки зрения достаточно точные результаты определения расчетной электрической нагрузки по нагреву получаются при длительности интервалов измерения 3, 5, 10 и 15 мин [13].

В [14] изложены результаты анализа почасовых и средних за сутки значений суточных графиков активной нагрузки, температуры воздуха, естественной освещенности, облачности и осадков г. Москвы. Предложена математическая модель на основе одномерного сингулярного спектрального анализа временных рядов естественной освещенности, облачности и осадков для повышения точности прогнозирования суточного графика активной нагрузки.

Целью исследования, представленного в [15], является выявление соответствия фактического электропотребления расчетному в распределительных электрических сетях с преобладанием коммунально-бытовых потребителей ряда городов Челябинской области. Определено расхождение между реальной электрической нагрузкой и ее нормативным значением, установленным действующими в настоящее время нормативными документами.

Результаты анализа электрических нагрузок на вводах ВРУ МКД приведены в [16]. Получена структура нагрузки ВРУ МКД относительно нормативного расчетного значения. В статье [17] обобщены типовые суточные графики нагрузки на вводе МКД с электрическими плитами из различных литературных источников и представлены современные суточные графики нагрузки на вводе в дома с электрическими плитами для различных дней недели (рабочие дни, суббота и воскресенье) зимы и лета. Для актуализированных графиков определены коэффициенты неравномерности, заполнения (плотности) и формы.

На примере Чанши (Китай), разработан метод, сокращающий объем работы и времени, необходимого для физического моделирования жилых комплексов, а также позволяющий быстро и точно моделировать почасовую нагрузку систем кондиционирования воздуха [27].

В статье [28] представлен метод прогнозирования, который использует комбинацию прогнозных значений на основе кластеризации временных рядов с использованием данных усовершенствованной измерительной инфраструктуры, одной из ключевых технологий интеллектуальных энергосистем [28]. Удаленный сбор данных с интервалом от 15 минут до 1 часа становится возможным благодаря развитию «расширенной инфраструктуры учета» и системам реального времени, передающим информацию о генерации и потреблении электроэнергии [29]. Однако прогнозирование усложняется из-за значительных колебаний в потреблении электроэнергии каждым домохозяйством. Точное прогнозирование спроса является важным для применения в интеллектуальных энергосистемах, и его точность может быть значительно улучшена за счет учета индивидуальных моделей потребления, представленных в данных умных счетчиков [30].

Прогнозирование социально-экономических характеристик домохозяйств, таких как уровень дохода и стиль приготовления пищи, на основе ежедневного потребления электроэнергии может быть крайне полезным для энергетических компаний. Это позволяет предлагать персонализированные услуги и переходить к более эффективному управлению энергопотреблением за счет внедрения программ энергосбережения. В данной статье [31] предлагается метод глубокого обучения (CNN-LSTM) для автоматического прогнозирования характеристик домохозяйств на основе данных об их энергопотреблении.

Материалы и методы (Materials and methods)

Максимумы электрических нагрузок имеют разные временные интервалы, как для однотипных, так и для разнородных объектов. В качестве примера выполнен анализ получасовых графиков электрических нагрузок на примере жилого комплекса г. Москвы, состоящего: МКД: №1 – 536 квартир, №2 – 442 квартиры, №3 – 688 квартир, №4 – 559 квартир, №5 – 704 квартиры; ДОУ: №1 – 250 воспитанников; №2 – 240 воспитанников; СОШ – 1490 учеников.

Графики электрических нагрузок пяти МКД представлены на рисунке 1а. Графики электрических нагрузок двух ДОУ и СОШ представлены на рисунке 1б. Суммарный график электрических нагрузок в центре питания представлен на рисунке 1в.

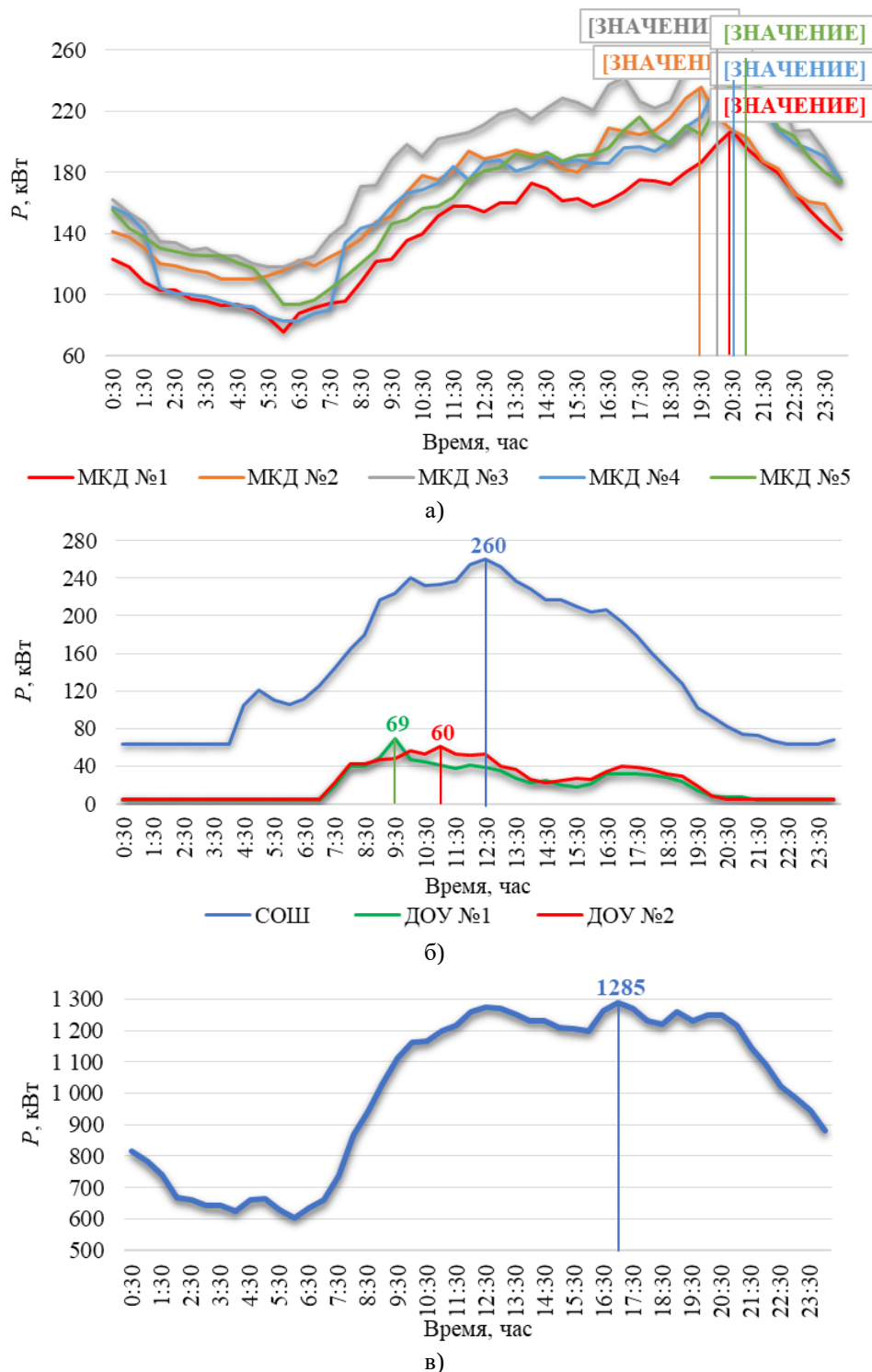


Рис. 1. Получасовые графики электрических нагрузок (а – МКД; б – ДОУ и СОШ; в – суммарный (совмещенный) график в центре питания)

Fig. 1. Half-hourly graphs of electrical loads (a – apartment buildings; b – kindergartens and schools; c – total (combined) graph in the food center)

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

Суммируя максимумы электрических нагрузок ТП (рис. 1а и 1б) рассматриваемого жилого комплекса по СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа», получаем 1 592 кВт (100%), в тоже время максимум нагрузок суммарного (совмещенного) графика (рис. 1в) составляет 1 285 кВт (80,7%).

Исследование посвящено взаимосвязи времени и величины максимальных нагрузок ТП и их потребителей.

Рассматриваемая выборочная совокупность ТП состоит из 15 подстанций г. Москвы и Московской области. Все потребители выборочной совокупности ТП являются непромышленными, имеют малую потребляемую мощность и постоянный режим потребления электрической энергии. Основными потребителями рассматриваемой выборки ТП являются МКД, ДОУ и СОШ, насосные станции и пункты питания наружного освещения. Все ТП рассматриваемой выборочной совокупности являются двухтрансформаторными, блочно-комплектного типа (БКТП), предназначенного для использования в системах электроснабжения жилищно-коммунальных, промышленных и других объектов в городах, а также строительных площадок и небольших коттеджных поселков. Класс напряжения на стороне высшего напряжения подстанций 10 (6) кВ, на стороне низшего напряжения подстанций 0,4 кВ. ТП имеют мощности силовых трансформаторов 630, 1000, 1250 и 1600 кВА. Для всех ТП сформирована база данных по графикам нагрузки за период наблюдения с 1.11.2021 г. по 31.07.2023 г.

На рисунке 2 приведена гистограмма, характеризующая распределение времени максимальной нагрузки ТП в течение суток. Также для удобства анализа приведено среднее время пиковых нагрузок ТП, питающих только МКД.

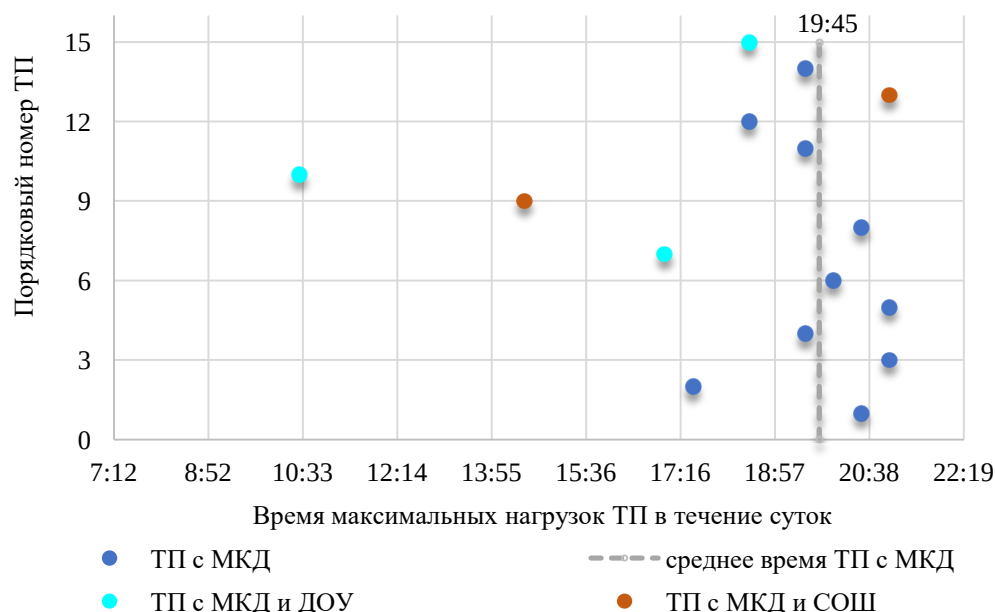


Рис. 2. Распределение времени максимальной нагрузки ТП в течение суток Fig. 2. Distribution of the time of maximum load of transformer substations during the day

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

Из рисунка 2 видно, что время максимальных нагрузок ТП, питающих однородную нагрузку (МКД), находится в диапазоне с 17:30 до 21:00 часов со средним значением 19:45.

Время максимальных нагрузок ТП со смешанным питанием, в составе потребителей которых есть ДОУ и СОШ, не совпадает со временем максимальных нагрузок подстанций, питающих только МКД (рис. 2). Время пиковых нагрузок таких ТП может смещаться на день и утро.

На основе результатов исследования графиков нагрузки ТП, подстанции жилых комплексов были разбиты на группы по типам потребителей, получающих от них питание: группа подстанций с однородной нагрузкой, питающих только МКД; группа подстанций со смешанным питанием потребителей различного назначения (МКД и образовательных учреждений).

На рисунке 3 показано распределение величины максимальной нагрузки всех

объектов рассматриваемых выборочных совокупностей в течение суток. По рисунку 3 видно, что максимумы нагрузки ДООУ и СОШ совпадают по времени и наблюдаются в утренние часы, в отличие от МКД, для которых максимальная нагрузка наблюдается вечером. Время максимумов нагрузки ТП, питающих только МКД, преимущественно совпадает по времени с максимумами жилых домов.

Можно отметить, что присутствие нагрузки образовательных учреждений в нагрузке ТП смещает время максимальной нагрузки таких подстанций с вечернего на дневной период. Но основную долю нагрузки таких ТП исследуемой выборки составляет нагрузка МКД.

Результаты расчетов максимальной нагрузки за период наблюдения выборочной совокупности ТП с разделением на группы по составу нагрузок демонстрируют, что по величине максимальной нагрузки за период наблюдения выделяются преимущественно месяцы зимнего периода года – декабрь и январь, но у ряда подстанций наблюдаются и летние максимумы, в основном, в июле.

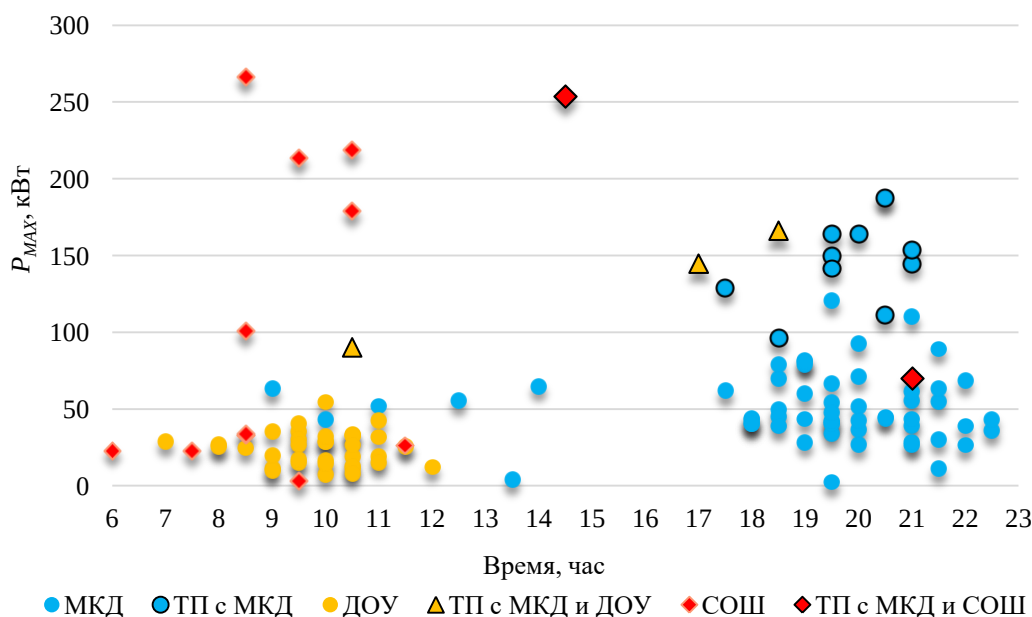


Рис. 3. Распределение максимальной нагрузки в течение суток Fig. 3. Distribution of the maximum load during the day

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

На рисунке 4 показано, какие месяцы календарного года и сколько раз встречаются в диапазоне нагрузки ТП 95% и выше от максимального значения для разных по составу нагрузки групп подстанций.

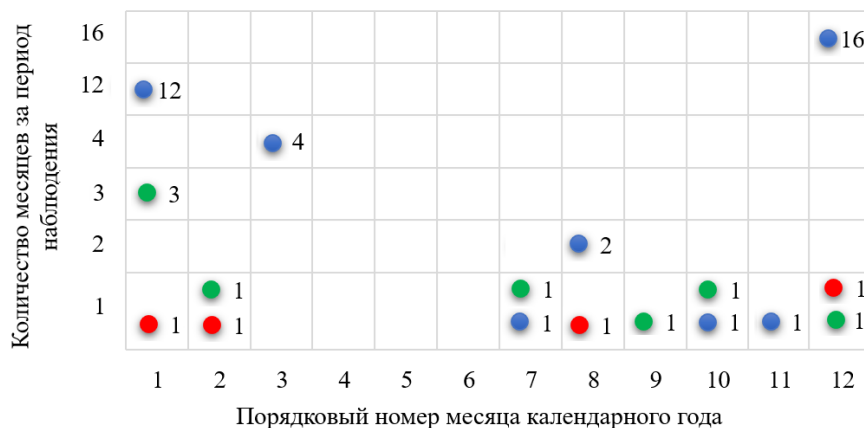


Рис. 4. Распределение максимальной нагрузки по месяцам календарного года Fig. 4. Distribution of maximum load by months of the calendar year

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

На рисунке 4 приняты следующие обозначения: синие маркеры – ТП, питающие МКД; зеленые маркеры – ТП, питающие МКД и ДОУ; красные маркеры – ТП, питающие МКД и СОШ. Подводя итоги, можно сделать вывод, что для группы подстанций, питающих МКД, основная нагрузка наблюдалась в зимние месяцы календарного года – декабрь и январь. Но также нужно принимать во внимание, что для одной ТП максимальное значение нагрузки подстанции достигла летом – в июле. У группы подстанций, питающих МКД и ДОУ, максимальная нагрузка подстанций преимущественно наблюдалась в январе.

Как было показано выше, для группы ТП, питающих МКД, максимальная нагрузка за месяцы календарного года наблюдалась в январе, декабре и июле. Эти месяцы принимаем в качестве характерных месяцев максимального электропотребления данной группы подстанций. Для группы подстанций, питающих МКД и ДОУ, предварительно принимаем в качестве характерных периодов месяцы: январь, февраль, июль, сентябрь, октябрь, декабрь. Для группы подстанций, питающих МКД и СОШ, предварительно в качестве характерных периодов принимаем месяцы: январь, февраль, август и декабрь.

За характерные месяцы года для групп ТП было определено суточное электропотребление. На рисунке 5 для примера приведены результаты расчетов распределения суточного электропотребления групп подстанций по рабочим и выходным дням недели характерных месяцев года для ТП, питаемых только МКД. Также на рисунке 5 показаны линии тренда, характеризующие изменение суточного электропотребления подстанций по рабочим (синий цвет) и выходным (красный цвет) дням недели.

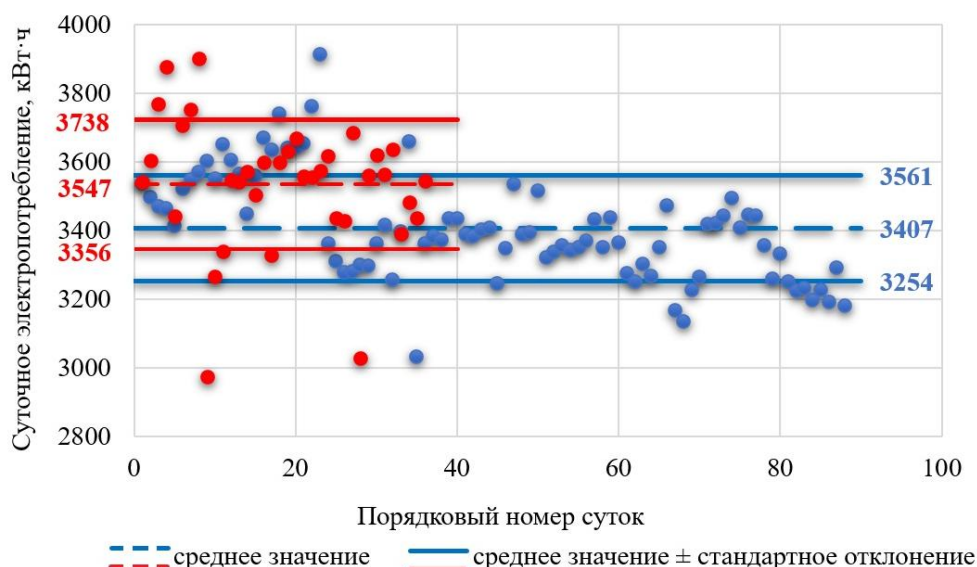


Рис. 5. Точечная диаграмма максимального электропотребления группы ТП, питающих только МКД, по дням недели

Fig. 5. Scatter diagram of maximum power consumption of a group of transformer substations supplying only apartment buildings by days of the week

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

Электропотребление служит интегральной оценкой уровня потребляемой мощности на длительных временных интервалах. Являясь весьма простым инструментом, тем не менее, оно позволяет выявлять тренды изменения нагрузок и при этом достаточно легко получить и обработать исходную информацию. Месячные интервалы наблюдения предоставляют информацию, какие именно периоды характерны высокими нагрузками и соответственно служат основой для детальных измерений графиков нагрузки. Суточные наблюдения позволяют выявить на ранней стадии, есть ли необходимость в формировании отдельных групп графиков нагрузки по рабочим дням недели, субботам и воскресеньям в зависимости от типа потребителей и их сочетаний (МКД, ДОУ, СОШ).

Анализ электропотребления по дням недели выявил, что для группы ТП, питающих МКД, наблюдается тенденция к росту электропотребления в выходные дни (рис. 5). Диапазон разницы электропотребления для подстанций данной группы составляет от 0,14 до 6,58%. Т.е. для МКД оправдано деление недели на рабочие и выходные дни. И последние должны служить основой для снятия суточных графиков нагрузки, по которым будет оцениваться требуемая мощность ТП. Для группы подстанций, питающих МКД и

образовательные учреждения, диапазон разницы электропотребления составляет от 1,91 до 11,75%, с ожидаемым снижением электропотребления на все выходные дни.

За характерные месяцы года для групп ТП была определена максимальная нагрузка за каждые сутки периода наблюдения. На рисунках 6-8 приведены точечные диаграммы, характеризующие распределение максимальной нагрузки группы подстанций, по рабочим (синий цвет) и выходным (красный цвет) дням недели характерных месяцев года.

По рисункам 6-8 можно сделать вывод, что наблюдается разница средней нагрузки ТП в рабочие и выходные дни. Но эта разница отличается по значению для разных групп подстанций.

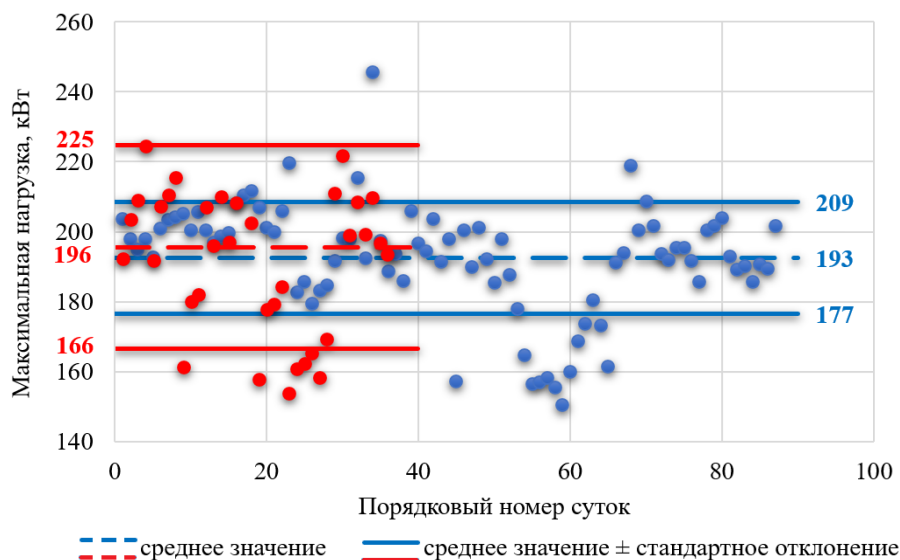


Рис. 6. Точечная диаграмма максимальной нагрузки группы ТП, питающих только МКД, по дням недели

Fig. 6. Scatter diagram of maximum load of a group of transformer substations, feeding only apartment buildings by days of the week

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

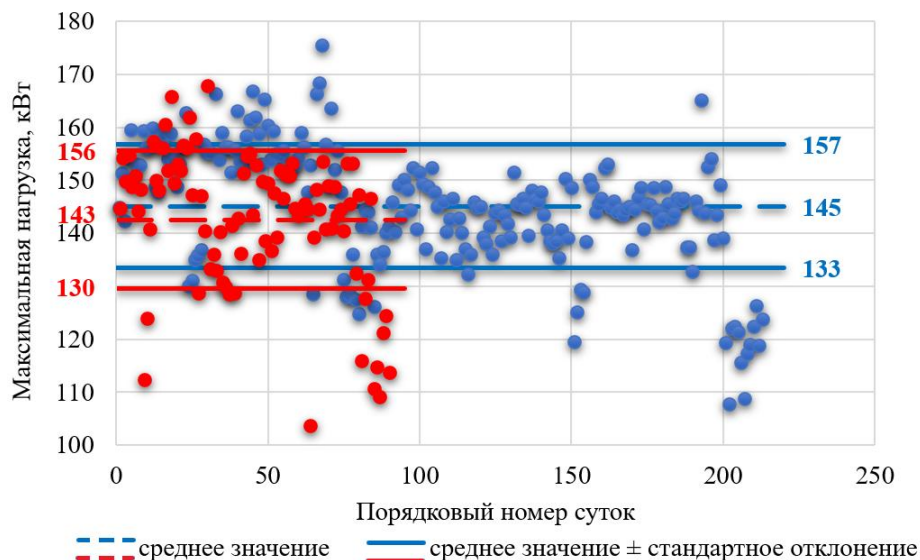


Рис. 7. Точечная диаграмма максимальной нагрузки группы ТП, питающих МКД и ДОУ, по дням недели

Fig. 7. Scatter diagram of maximum load of a group of transformer substations, feeding apartment buildings and kindergartens by days of the week

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

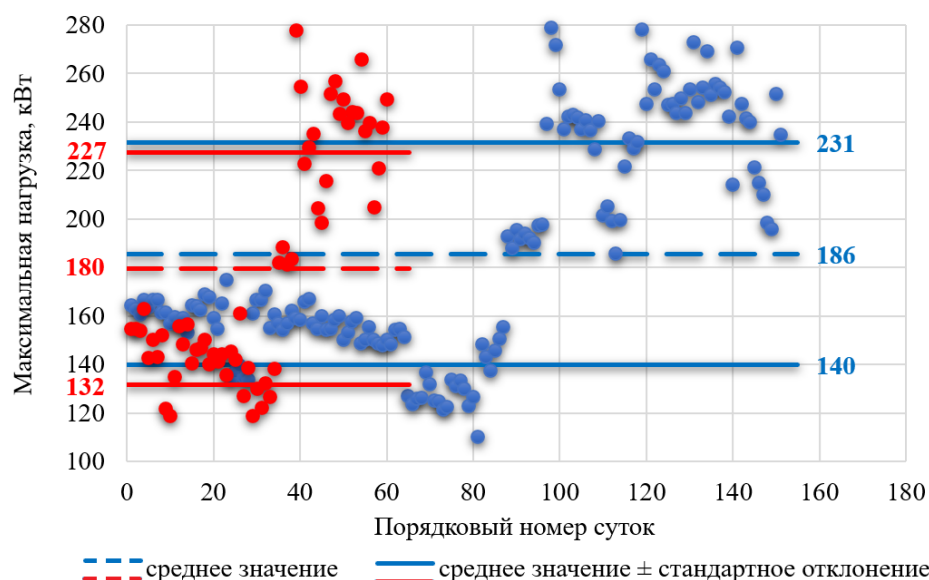


Рис. 8. Точечная диаграмма максимальной нагрузки группы ТП, питающих МКД и СОШ, по дням недели

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

Результаты (Results)

У группы подстанций, питающих МКД, преимущественно наблюдалось увеличение нагрузки в выходные дни. Диапазон увеличения нагрузки в выходные дни у подстанций группы составлял от 1 до 3%.

Средняя нагрузка выходных дней характерных месяцев для группы подстанций, питающих МКД и ДОУ, ниже нагрузок рабочих дней недели. Диапазон разницы нагрузки рабочих и выходных дней для подстанций рассматриваемой группы – от 2 до 12%.

Расчет разницы между средней нагрузкой рабочих и выходных дней характерных месяцев для группы ТП, питающих МКД и СОШ, не превышает 4%. При этом нагрузка в воскресные дни у ТП группы больше нагрузки чем в субботние дни.

Разрабатываемая методика суммирования на шинах подстанции различных нагрузок должна учитывать фактор возможности сочетания максимальной нагрузки МКД, приходящейся на лето, с объектами, оснащаемыми бытовыми или промышленными кондиционерами.

Обсуждение (Discussions)

Максимальные значения нагрузки определяют сечения питающих кабелей и номинальную мощность трансформаторов. Для основной части группы подстанций, питающих МКД, основная нагрузка за период наблюдения с 1.11.2021 по 31.07.2023 гг. фиксировалась в зимние месяцы календарного года – декабрь и январь. Поскольку в МКД входила и коммерческая нагрузка, при разработке методики суммирования на шинах подстанции различных нагрузок необходимо учитывать фактор возможности сочетания максимальной нагрузки МКД, приходящейся на лето, с объектами, оснащаемыми бытовыми или промышленными кондиционерами.

Максимальные нагрузки ТП, питающих МКД и ДОУ, а также МКД и СОШ, приходится на рабочие дни. Расчетная нагрузка таких ТП должна суммироваться с нагрузкой МКД в рабочие дни с учетом дневного максимума нагрузки образовательных учреждений для чего необходимо предусмотреть корректирующий коэффициент.

Выводы (Conclusions)

Анализ электропотребления и величины нагрузки в различные периоды времени года на подстанциях, питающих МКД, МКД и ДОУ, МКД и СОШ, показал следующее: преимущественно нагрузка МКД приходится на выходные зимние дни, по которым должна выполняться проверка разрабатываемой методики суммирования нагрузок на шинах подстанций. Максимальная нагрузка МКД приходится на вечерние часы. В этой связи можно не рассматривать отдельно субботний режим работы СОШ, т.к. нагрузка их ниже, чем в рабочие дни, и суммирование с нагрузкой МКД будет выполняться за рабочие дни.

Максимальные нагрузки подстанций, питающих МКД и ДОУ, а также МКД и СОШ, приходится на зимние месяцы. ДОУ работают с двумя выходными днями, и их

расчетная нагрузка должна суммироваться с нагрузкой МКД в рабочие дни с учетом дневного максимума нагрузки ДОУ. Поскольку 31 декабря ДОУ и СОШ не работают, целесообразно предусмотреть корректирующий коэффициент для расчетной нагрузки МКД, при её суммировании с нагрузкой ДОУ и СОШ. Тем самым будет учтено, что удельные нагрузки МКД в СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» вводились исходя из её замеров на 31 декабря.

Также следует дополнительно использовать информацию о суточных графиках нагрузки СОШ с двухсменным режимом работы, т.к. при проектировании СОШ ориентируются на односменный режим работы, но по факту может вводиться вторая смена. Поэтому не целесообразно вводить в нормативные документы отдельную категорию «количество смен в СОШ».

Литература

1. Солуянов Ю. И., Федотов А. И., Галицкий Ю. Я., и др. Актуализация нормативных значений удельной электрической нагрузки многоквартирных домов в Республике Татарстан // *Электричество*. 2021. № 6. С. 62-71. DOI 10.24160/0013-5380-2021-6-62-71. EDN RRSRRX.
2. Солуянов Ю. И., Федотов А. И., Ахметшин А. Р., и др. Актуализация удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Москвы и Московской области // *Электричество*. 2023. № 7. С. 52-65. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-7-52-65. EDN IQAFRE.
3. Солуянов Ю. И., Федотов А. И., Ахметшин А. Р., и др. Анализ удельных электрических нагрузок коттеджных поселков // *Электричество*. 2024. № 4. С. 36-50. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-4-36-50.
4. Солуянов Ю. И., Федотов А. И., Солуянов В. И., и др. Выбор зарядных станций, согласованный с действующими системами электроснабжения многоквартирных домов и образовательных учреждений мегаполиса // *Электричество*. 2025. № 1. С. 32-44. DOI 10.24160/0013-5380-2025-1-32-44. EDN HOCOCV.
5. Солуянов Ю. И., Федотов А. И., Ахметшин А. Р., и др. Результаты статистического анализа электрических нагрузок многоквартирных домов г. Москвы // *Электрические станции*. 2023. № 2(1099). С. 22-28. EDN WUEGJL.
6. Солуянов В. И., Солуянов Ю. И., Федотов А. И., и др. Разработка изменений в строительный свод правил в части актуализации удельных расчетных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2023. Т. 25. № 6. С. 89-100. DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-89-100. EDN EMZZMR.
7. Грачева Е. И., Наумов О. В., Федотов Е. А. Влияние нагрузочной способности силовых трансформаторов на их эксплуатационные характеристики // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. Т. 19. № 7-8. С. 71-77. EDN ZTQXSD.
8. Грачева Е. И., Наумов О. В., Садыков Р. Р. Учет холостого хода трансформаторов в период эксплуатации при расчете потерь электроэнергии в распределительных сетях // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2016. № 1-2. С. 53-63. EDN VXLFSB.
9. Юндин М., Пономаренко Т., Юндин К. Анализ сверхнормативных потерь мощности в силовых трансформаторах 10/0,4 кВ, имеющих нагрузку с преобладанием нелинейных потребителей // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2021. № S1(20). С. 6-12. EDN HJJBUL.
10. Надтока И. И., Павлов А. В. Расчёты электрических нагрузок жилой части многоквартирных домов с электрическими плитами, основанные на средних нагрузках квартир // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2014. № 3. С. 36-39. EDN SIAKJT.
11. Надтока И. И., Звозникова И. А., Васильев Г. П. и др. Анализ основных закономерностей в электропотреблении жилой части многоквартирных домов в Московском регионе // *Промышленная энергетика*. 2023. № 11. С. 21-27. DOI 10.34831/EP.2023.71.11.003. EDN KKRRBA.
12. Надтока И. И., Звозникова И. А. Оценка вклада взаимной корреляции индивидуальных графиков в дисперсию суммарного графика электрической нагрузки // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2023. Т. 66, № 4. С. 136-143. DOI 10.17213/0136-3360-2023-4-136-143. EDN KGYBDW.
13. Надтока И. И., Звозникова И. А., Туруткин С. Ю. и др. Влияние длительности интервала измерений потребления электроэнергии на точность определения максимальной нагрузки по нагреву // *Промышленная энергетика*. 2022. № 12. С. 21-25. DOI 10.34831/EP.2022.36.20.003. EDN CEOPYU.
14. Вялкова С. А., Надтока И. И. Прогнозирование суточных графиков активной мощности мегаполиса с учетом прогнозных данных естественной освещенности // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2020. Т. 63, № 5. С. 67-71. DOI 10.17213/0136-3360-2020-5-67-71. EDN NCCLFU.

15. Таваров С. Ш., Сидоров А. И., Суворов И. Ф. и др. Метод прогнозирования и расчёта электрической нагрузки коммунально-бытовых потребителей в условиях неопределённости // *iPolytech Journal*. 2023. Т. 27, № 3. С. 565-573. DOI 10.21285/1814-3520-2023-3-565-573. EDN TVYZCE.
16. Морсин И. А., Шведов Г. В. Формирование электрических нагрузок на шинах вводного распределительного устройства современных многоквартирных домов // *Промышленная энергетика*. 2023. № 7. С. 22-29. DOI 10.34831/EP.2023.39.42.003. EDN COUNZV.
17. Соловьева А. С., Шведов Г. В. Сравнительный анализ зимних и летних графиков электрической нагрузки рабочих и выходных дней многоквартирных домов с электроплитами в системах электроснабжения крупных городов // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2023. Т. 23, № 1. С. 27-37. DOI 10.14529/power230103. EDN WNEGUM.
18. Савина Н. В., Лисогурская Л. Н., Лисогурский И. А. Накопители электрической энергии как средство повышения надёжности и экономичности функционирования электрической сети // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2020. № 2-1(92). С. 63–70.
19. Илюшин П. В. Повышение надёжности функционирования распределительных электрических сетей за счет эффективного применения систем накопления электроэнергии // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2022. № 6(75). С. 64–74.
20. Суворов А. А., Илюшин П. В. Модернизация алгоритма виртуального синхронного генератора для управления системой накопления электроэнергии в микросети // *Электричество*. 2024. № 7. С. 14-29.
21. Лоскутов А. Б., Соснина Е. Н., Лоскутов А. А. и др. Интеллектуальные распределительные сети 10–20 кВ с гексагональной конфигурацией // *Промышленная энергетика*. 2013. № 12. С. 3–7.
22. Лоскутов А.Б., Лоскутов А.А., Зырин Д.В. Разработка и исследование гибкой интеллектуальной электрической сети среднего напряжения, основанной на гексагональной структуре // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2016. №3 (114). С. 85–94.
23. Лоскутов А. Б., Соснина Е. Н., Лоскутов А. А. и др. Городские распределительные сети 10–20 кВ с гексагональной конфигурацией // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2013. № 5(102). С. 309–315.
24. Соснина Е. Н., Липужин И. А., Крюков Е. В. Перспективы внедрения гексагональных распределительных электрических сетей // *Инженерный вестник Дона*. 2013. № 4(27). С. 67.
25. Кудрин Б. И. Расчет электрических нагрузок потребителей: история, состояние, комплексный метод // *Промышленная энергетика*. 2015. № 5. С. 14-22.
26. Клюев Р. В. Системный анализ методов расчета систем электроснабжения карьеров // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024. Т. 16. № 1(59). С. 302-310.
27. Zhang X., He Y., Li X. A simplified method for calculating air conditioning load of multi-family housing community considering the spatiotemporal distribution of occupants // *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 324. Article number 114888. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114888.
28. Kim H., Park S., Kim S. Time-series clustering and forecasting household electricity demand using smart meter data // *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. P. 4111 – 4121. DOI: 10.1016/j.egyr.2023.03.042.
29. Softah W., Tafakori L., Song H. Analyzing and predicting residential electricity consumption using smart meter data: A copula-based approach // *Energy and Buildings*. 2025. Vol. 332. Article number 115432. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.115432.
30. Suresh M., Anbarasi M. S. Interactive search algorithm of artificial intelligence for household classification on smart electricity meter data // *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*. 2022. Vol. 13. Iss. 3. P. 183 – 193. DOI: 10.1504/IJESMS.2022.123952.
31. Xu R., Li X. D., Huang L. A deep learning method for household characteristic classification from smart meter data // *2nd International Conference on Electronic Materials and Information Engineering*. 2022. Vol. 2. P. 937 – 941.

Авторы публикации

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

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

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

Кулаков Виктор Николаевич – аспирант кафедры «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. Email: viktor.nikolaevich.kulakov@mail.ru

References

1. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Galitsky YuYa, et al. Updating the standard values of the specific electrical load of apartment buildings in the Republic of Tatarstan. *Electricity*. 2021; 6:62-71. (In Russ). doi: 10.24160/0013-5380-2021-6-62-71
2. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR, et al. Updating the specific electrical loads of apartment buildings in Moscow and the Moscow region. *Electricity*. 2023; 7:52-65. (In Russ). doi: 10.24160/0013-5380-2023-7-52-65
3. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR, et al. Analysis of specific electrical loads of cottage villages. *Electricity*. 2024; 4:36-50. (In Russ). doi: 10.24160/0013-5380-2024-4-36-50
4. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Soluyanov VI, et al. Selection of charging stations, coordinated with the existing power supply systems of apartment buildings and educational institutions of a megalopolis. *Electricity*. 2025; 1:32-44. (In Russ). doi: 10.24160/0013-5380-2025-1-32-44
5. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR, et al. Results of statistical analysis of electrical loads of apartment buildings in Moscow. *Electric stations*. 2023; 1099(2):22-28. (In Russ).
6. Soluyanov VI, Soluyanov YuI, Fedotov AI, et al. Development of amendments to the building code of rules in terms of updating the specific calculated electrical loads of apartment buildings. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2023; 25(6):89-100. (In Russ). doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-6-89-100
7. Gracheva EI, Naumov OV, Fedotov EA. Influence of the load capacity of power transformers on their operational characteristics. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2017; 19(7-8):71-77. (In Russ).
8. Gracheva EI, Naumov OV, Sadykov RR. Accounting for idle waste of transformers during operation when calculating electricity losses in distribution networks. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2016;(1-2):53-63. (In Russ).
9. Yundin M, Ponomarenko T, Yundin K. Analysis of excess power losses in 10/0.4 kV power transformers with a load dominated by nonlinear consumers. *Electric power. Transmission and Distribution*. 2021; 20(S1):6-12. (In Russ).
10. Nadtoka II, Pavlov AV. Calculations of electrical loads in the residential part of apartment buildings with electric stoves based on average apartment loads. *Bulletin of higher educational institutions. Electromechanics*. 2014; 3:36-39. (In Russ).
11. Nadtoka II, Zvoznikova IA, Vasiliev GP, et al. Analysis of the main patterns in electricity consumption in the residential part of apartment buildings in the Moscow Region. *Industrial Power Engineering*. 2023; 11:21-27. (In Russ). doi: 10.34831/EP.2023.71.11.003
12. Nadtoka II, Zvoznikova IA. Evaluation of the contribution of mutual correlation of individual graphs to the variance of the total graph of electrical load. *Bulletin of higher educational institutions. Electromechanics*. 2023. Vol. 66, No. 4. Pp. 136-143. (In Russ). doi: 10.17213/0136-3360-2023-4-136-143
13. Nadtoka II, Zvoznikova IA, Turutkin SYu, et al. Influence of the duration of the interval of electricity consumption measurements on the accuracy of determining the maximum heating load. *Industrial Power Engineering*. 2022; 12:21-25. (In Russ). doi: 10.34831/EP.2022.36.20.003
14. Vyalkova SA, Nadtoka II. Forecasting daily schedules of active power of a megalopolis taking into account forecast data of natural illumination. *Bulletin of higher educational institutions. Electromechanics*. 2020; 63(5):67-71. (In Russ). doi: 10.17213/0136-3360-2020-5-67-71
15. Tavarov SSh, Sidorov AI, Suvorov IF, et al. Method of forecasting and calculating the electrical load of public utilities under uncertainty. *iPolytech Journal*. 2023; 27(3):565-573. (In Russ). doi: 10.21285/1814-3520-2023-3-565-573
16. Morsin IA, Shvedov GV. Formation of electrical loads on the buses of the input distribution device of modern apartment buildings. *Industrial Power Engineering*. 2023; 7:22-29. (In Russ). doi: 10.34831/EP.2023.39.42.003
17. Solovieva AS, Shvedov GV. Comparative analysis of winter and summer schedules of electrical loads on working and weekend days in apartment buildings with electric stoves in the power supply systems of large cities. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2023; 23(1):27-37. (In Russ). doi: 10.14529/power230103
18. Savina NV, Lisogurskaya LN, Lisogursky IA. Electric energy storage devices as a means of increasing the reliability and efficiency of the electric grid. *International Research Journal*. 2020; 92(2-1):63-70. (In Russ).
19. Ilyushin PV. Improving the reliability of distribution electric networks through the efficient use of electricity storage systems. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2022; 75(6):64-74. (In Russ).

20. Suvorov AA, Ilyushin PV. Modernization of the algorithm of a virtual synchronous generator for controlling the electric power storage system in a microgrid. *Electricity*. 2024; 7:14-29. (In Russ).
21. Loskutov AB, Sosnina EN, Loskutov AA, et al. Intelligent distribution networks of 10-20 kV with a hexagonal configuration. *Industrial Power Engineering*. 2013; 12:3-7. (In Russ).
22. Loskutov AB, Loskutov AA, Zyrin DV. Development and study of a flexible intelligent medium-voltage electric grid based on a hexagonal structure. *Proceedings of NSTU named after R. E. Alekseev*. 2016; 114(3):85-94. (In Russ).
23. Loskutov AB, Sosnina EN, Loskutov AA, et al. Urban distribution networks 10-20 kV with hexagonal configuration. *Proceedings of NSTU named after R. E. Alekseev*. 2013; 102(5):309–315. (In Russ).
24. Sosnina EN, Lipuzhin IA, Kryukov EV. Prospects for the implementation of hexagonal distribution electrical networks. *Engineering Bulletin of the Don*. 2013; 27(4):67. (In Russ).
25. Kudrin BI. Calculation of consumer electrical loads: history, status, and integrated method. *Industrial Power Engineering*. 2015; 5:14–22. (In Russ).
26. Klyuev RV. Systems analysis of methods for calculating power supply systems for quarries. *Sustainable development of mountainous territories*. 2024; 59(1):302-310. (In Russ). doi: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-302-310
27. Zhang X, He Y, Li X. A simplified method for calculating air conditioning load of multi-family housing community considering the spatiotemporal distribution of occupants. *Energy and Buildings*. 2024; 324:114888. doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114888
28. Kim H, Park S, Kim S. Time-series clustering and forecasting household electricity demand using smart meter data. *Energy Reports*. 2023; 9:4111-4121. doi: 10.1016/j.egyr.2023.03.042
29. Softah W, Tafakori L, Song H. Analyzing and predicting residential electricity consumption using smart meter data: A copula-based approach. *Energy and Buildings*. 2025; 332:115432. doi: 10.1016/j.enbuild.2025.115432
30. Suresh M, Anbarasi MS. Interactive search algorithm of artificial intelligence for household classification on smart electricity meter data. *International Journal of Engineering Systems Modeling and Simulation*. 2022;13(3):183-193. doi: 10.1504/IJESMS.2022.123952
31. Xu R, Li XD, Huang L. A deep learning method for household characteristic classification from smart meter data. *2nd International Conference on Electronic Materials and Information Engineering*. 2022; 2:937-941.

Authors of the publication

Alexander I. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4235-8038>. Email: fed.ai@mail.ru

Azat R. Akhmetshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>. Email: ahmetshin.ar@mail.ru

Eugenii A. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: evfedotov2008@mail.ru

Viktor N. Kulakov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: viktor.nikolaevich.kulakov@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено 16.01.2025 г.

Отредактировано 19.02.2025 г.

Принято 15.03.2025 г.



СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СЕТЯХ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ ВИЭ

Надергулов М.М.¹, Исаков Р.Г.^{1,2}

¹Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева–КАИ, г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
nadergulov97@mail.ru, ruslanisakov@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в необходимости решения существующих проблем, возникающих в области релейной защиты распределительных сетей 6-10 кВ при внедрении источников распределенной генерации. ЦЕЛЬ. Провести анализ влияния источников распределенной генерации на режимы работы распределительной сети 6-10 кВ. Выявить проблемы функционирования устройств релейной защиты в распределительных сетях 6-10 кВ при наличии источников распределенной генерации, подключаемых к распределительной сети с помощью инвертора. МЕТОДЫ. Осуществляется обзор и анализ литературных источников, а также анализ данных международного информационного обмена. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, подробно рассмотрены инверторные источники распределенной генерации с точки зрения их подключения и воздействия на распределительную сеть; проведен сравнительный анализ применения традиционных источников и источников распределенной генерации в распределительных сетях, проведен анализ их влияния на величину токов короткого замыкания и параметры электрической сети; проведен обзор существующих проблем и решений функционирования устройств релейной защиты в распределительных сетях при использовании источников распределенной генерации. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование инверторных источников распределенной генерации создают проблемы функционирования устройств релейной защиты за счет ограничения пропускной способности инвертора и вариативностью топологии сети. В настоящий момент для существующих проблем имеются научные наработки по их решению с присущими им достоинствами и недостатками.

Ключевые слова: релейная защита (РЗ); распределительная сеть (РС); распределенная генерация (РГ); инвертор.

Для цитирования: Надергулов М.М., Исаков Р.Г. Современное состояние проблем функционирования устройств релейной защиты, применяемых в сетях с распределенной генерацией на основе ВИЭ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 90-125. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-90-125.

MODERN STATE OF FUNCTIONING OF RELAY PROTECTION DEVICES USED IN RES-BASED DISTRIBUTED GENERATION NETWORKS

Nadergulov M.M.¹, Isakov R.G.^{1,2}

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI, Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
nadergulov97@mail.ru, ruslanisakov@yandex.ru

Abstract: RELEVANCE of the research lies in the need to solve the existing problems arising in the field of relay protection of 6-10 kV distribution networks during the introduction of distributed generation sources. THE PURPOSE. To analyze the influence of distributed generation sources on

the operating modes of a 6-10 kV distribution network. To identify the problems of operation of relay protection devices in 6-10 kV distribution networks in the presence of distributed generation sources connected to the distribution network using an inverter. **METHODS.** The review and analyze of literary sources, as well as the analysis of international information exchange data is carried out. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, examines in detail inverter sources of distributed generation from the point of view of their connection and impact on the distribution network; a comparative analysis of the use of traditional sources and sources of distributed generation in distribution networks, an analysis of their influence on the magnitude of currents is carried out. **CONCLUSION.** The use of inverter-based distributed generation sources creates problems for the operation of relay protection devices due to the limitation of inverter capacity and variability of network topology. At present, for the existing problems, there are scientific developments to solve them with their inherent advantages and disadvantages.

Keywords: relay protection (RP); distribution network (DN); distributed generation (DG); inverter.

For citation: Nadergulov M.M., Isakov R.G. Modern state of functioning of relay protection devices used in res-based distributed generation networks. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (2): 90-125. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-90-125.

Введение (Introduction)

Распределенная генерация представляет собой инновационный подход к производству энергии, который отличается от традиционных централизованных энергетических систем. Вместо крупных электростанций, распределенная генерация основана на использовании множества малых источников энергии, распределенных ближе к местам потребления, преимущественно используя возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Этот подход не только повышает надежность и эффективность энергоснабжения, но также способствует снижению выбросов парниковых газов и улучшению экологической устойчивости энергетической системы [1-3].

Помимо колоссального перехода к использованию ВИЭ во всем мире и их преимуществ по отношению к традиционным источникам, внедрение РГ оказывает значительное влияние на распределительные сети (РС) 6-10 кВ, питающие сети 110-220 кВ, а также релейную защиту (РЗ) объектов электроэнергетики. В зависимости от типа источника, его номинальной мощности и способа подключения, РГ по-разному влияет на сеть при возникновении в ней неисправности [7].

Рассматривая РС 6-10 кВ, являющиеся радиальными по своей структуре, в которых используется один источник питания, поток мощности в этих сетях протекает в одном направлении. По мере реализации источников РГ на практике стали выявляться проблемы с изменением структуры и электрических параметров РС [47], увеличением токов короткого замыкания (КЗ), нарушением координации релейной защиты, возможности ложных отключений и несрабатываний [9].

Несрабатывания РЗ также являются проблемой при подключении РГ на основе ВИЭ к сети 110-220 кВ. Во многом обусловлено это пропускной способностью инвертора, параметры которого выбираются исходя из максимально-допустимой выходной мощности РГ. И при возникновении на участке линии 110-220 кВ аварийного режима – КЗ, к которой подключена РГ, ток подпитки КЗ от источника РГ будет таким же, как и в нормальном режиме работы, что вызовет несрабатывание устройства РЗ.

Актуальность исследования обусловлена тем, что в настоящее время проработка алгоритмов функционирования устройств РЗ в условиях интеграции в электроэнергетическую систему (ЭЭС) инверторных источников РГ представляется недостаточной, отсутствуют обоснованные решения в области РЗ для полноценного внедрения этих источников в ЭЭС.

Цель исследования заключается в проведении анализа влияния источников распределенной генерации как на режимы работы распределительной сети, так и на функционирование релейной защиты, применяемых в ЭЭС с инверторными источниками РГ.

Данная цель достигается решением следующих задач:

1. Проведение исследования вариативности схем подключения и режимов работы инверторных источников РГ;

2. Анализ проблем функционирования устройств РЗ при применении их в сетях с инверторными источниками РГ;

3. Определение перспективных направлений совершенствования алгоритмов функционирования устройств РЗ РС с инверторными источниками РГ.

Научная новизна заключается в детальном анализе влияния распределенной генерации на релейную защиту и величину тока короткого замыкания, исследовании новых подходов к адаптации релейной защиты в распределительных сетях с ВИЭ.

Практическая значимость исследования заключается в обосновании необходимости модернизации релейной защиты для интеграции ВИЭ, проведении численной оценки влияния источников РГ на величину тока КЗ, выявлении ключевых факторов, влияющих на стабильность работы РЗ при изменении конфигурации, а также в необходимости пересмотра требований к наладке устройств РЗ в сетях с высокой долей РГ.

Литературный обзор (Literature Review)

Распределенной генерацией (РГ) является производство электроэнергии объектами значительно меньшей мощности, чем центральные электрические станции, с возможностью их подсоединения практически в любой точке системы электроснабжения [26]. Преимущества РГ заключаются как в повышении энергоэффективности, расширении видов используемой энергии, снижении пиковых нагрузок, поддержание уровня напряжения, снижение потерь при распределении и передаче электроэнергии, повышение надежности и решение проблем электроснабжения удаленных территорий. Но, не смотря на все плюсы, введение в работу значительной мощности РГ приводит к увеличению токов короткого замыкания, а также ложному срабатыванию устройств релейной защиты и ухудшению показателей качества электрической энергии. [26].

В данном контексте изучение, понимание принципов и проблем, связанных с распределенной генерацией, становится ключевым для энергетических специалистов, решающих вопросы будущего энергетического сектора. [3, 8].

Наиболее популярными направлениями использования технологий РГ, в настоящее время, являются: ветроэнергетика; солнечная энергетика; биоэнергетика; микротурбины и газовые турбины [23, 42]. Классификация которых, с точки зрения их подключения и технологии детально проанализирована и определена в работе [11] (рис. 1).

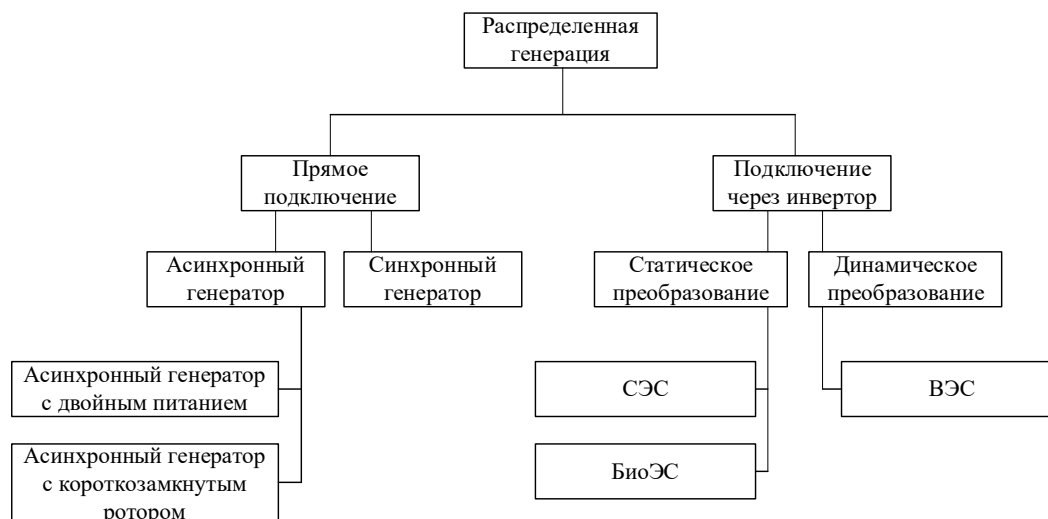


Рис. 1. Классификация РГ по технологии и типу подключения Fig. 1. Classification of DGs by technology and connection type

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

Обычно источники РГ классифицируют в соответствии с их различными типами и технологиями эксплуатации, однако, для более детального изучения их влияния на распределительную систему необходимо рассматривать их с электрической точки зрения. При этом можно получить классификацию различных типов РГ в зависимости от их применения в распределительной сети, продолжительности работы, типа вырабатываемой мощности, возобновляемых или невозобновляемых технологий [11]. Расширенный список децентрализованных технологий с возобновляемыми и невозобновляемыми источниками энергии приведен в таблице 1 [16, 24].

Таблица 1
Table 1Технологии распределенной генерации [16, 24]
Distributed generation technologies [16, 24]

№ п/п	Технология	Генерируемая мощность
1	Газовые турбины комбинированного цикла	35 МВт – 400 МВт
2	Двигатели внутреннего сгорания	5 кВт – 17 МВт
3	Газовая турбина	1 МВт – 250 МВт
4	Микрогазовая турбина	35 кВт – 1 МВт
5	Двигатель Стирлинга	2 кВт -10 кВт
6	Мини-ГЭС	1 МВт – 100 МВт
7	Микро-ГЭС	25 кВт – 1 МВт
8	Ветряные турбины	200 Вт – 5 МВт
9	Солнечные панели	20 Вт – 100 кВт
10	Солнечная тепловая энергия	1 МВт – 10 МВт
11	Газификация биомассы	100 кВт – 20 МВт
12	Топливные элементы – фосфорная кислота	200 кВт – 2 МВт
13	Топливные элементы – расплав карбоната	250 кВт – 2 МВт
14	Топливные элементы – протонный обмен	1 кВт – 250 кВт
15	Топливные элементы – твердый оксид	250 кВт – 5 МВт
16	Геотермальная энергия	5 МВт – 100 МВт
17	Энергия океана	100 кВт – 1 МВт
18	Аккумуляторные батареи	500 кВт – 5 МВт

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

В качестве источников РГ, подключаемых к распределительной сети (РС) через инвертор, большее применение находят асинхронные генераторы (АГ) [17]. Асинхронные генераторы обычно используются на ветряных электрических станциях (ВЭС). Принцип работы заключается в выработке переменного тока с дальнейшим его преобразованием в постоянный ток с помощью инвертора и последующего возвращения переменного тока в РС. Поскольку генерируемое напряжение и частота на выходе генератора не стабильны, добиться равного соотношения напряжения и частоты с основной сетью может инвертор. Инвертор преобразует переменный ток в постоянный, а затем приводит его к соответствующей частоте и напряжению для соединения с распределительной сетью [12].

Основное преимущество АГ заключается в возможности регулирования и контроля генерируемой мощности с помощью инвертора, а также меньших габаритах и низкой стоимости по сравнению с синхронными генераторами.

Подробные типы подключения источников распределенной генерации показаны в таблице 2.

Таблица 2
Table 2Типы подключения источников распределенной генерации
Types of connection of distributed generation sources

Источники РГ	Тип подключения
Ветроэнергетика	Инвертор/асинхронный генератор
Малая энергетика	Синхронный генератор
Солнечная энергетика	Инвертор
Микротурбина	Синхронный генератор
Электромобили	Инвертор
Аккумуляторные батареи	Инвертор
Топливные элементы	Инвертор
Энергия биомассы	Синхронный генератор/инвертор

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

Самыми распространенными источниками РГ, которые подключаются к сети напрямую, являются синхронные генераторы. Особенностью синхронных генераторов является их работа с постоянной скоростью вращения, что на выходе обеспечивает стабильное напряжение. Изменяя магнитное поле возбуждения, можно управлять напряжением на клеммах и реактивной мощностью синхронного генератора.

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) в основном подключаются к сети через инвертор (рис. 2), которое преобразует постоянный ток (например, от солнечных панелей или аккумуляторов) в переменный ток, который может быть использован для питания различных потребителей электрической энергии. Инвертор обеспечивает связь между источником распределенной генерации и сетью для синхронизации параметров генерируемого напряжения внешним источником с напряжением основной сети. Технологии инверторов могут быть применены ко всем источникам РГ одинаково, однако различия заводских параметров и типов источников РГ влияют на управление самого инвертора. Производительность и эффективность таких систем зависят как от возможностей инвертора, так и от возможностей источника РГ [15, 16].



Рис. 2. Структура преобразования электрической энергии РГ на основе ВИЭ Fig. 2. Structure of electric energy conversion of DG based on RES

*Источник: [15] Source: [15].

Типовые примеры структуры источников РГ, подключенных к основной сети через инвертор показаны на рисунке 3. Источником РГ может быть: (а) источник постоянного тока или (б) источник переменного тока, который преобразуется в постоянный. Вариативность таких преобразователей может быть разная. В случае с СЭС, АКБ и БиоЭС используется инвертор DC/AC, так как изначально, генерируемое или запасенное напряжение таких источников является постоянным. В другом случае, при использовании асинхронного генератора двойного питания (DFIG) или синхронного генератора (СГ), встает необходимость в двойном преобразовании – AC/DC/AC. Это необходимо для синхронизации генерируемого напряжения с напряжением основной сети, уменьшения потерь и повышения эффективности работы таких установок. [28].

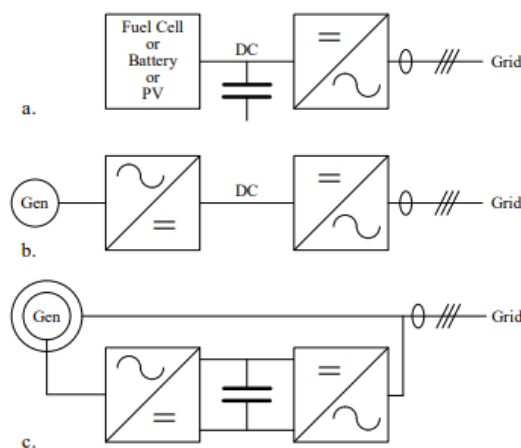


Рис. 3. (а) СЭС, АКБ или БиоЭС (b) Fig. 3. (a) solar power plants, storage batteries or microturbine or СГ (c) и DFIG biomass power plants (b) microturbine or synchronous generator (c) and DFIG

*Источник: [15] Source: [15].

Не маловажной особенностью инверторов является их функциональность. В последнее время широко применяются инверторы с функциями LVRT (Low Voltage Ride-Through) и HVRT (High Voltage Ride-Through) [29]. Оба параметра важны для обеспечения стабильной работы в электрической сети, особенно при использовании в системах распределенной энергетики.

LVRT – функция инверторного преобразователя, которая позволяет на протяжении сильного непродолжительного падения напряжения (отключения части генераторов) или сбоя в сети (отключения питания) в точке присоединения объекта РГ в заданном диапазоне не отключать инверторные станции и продолжать выдавать электроэнергию. HVRT – возможность генератора или их группы оставаться подключенным к сети и передавать мощность в периоды временных увеличений напряжения [14]. Обе функции изображены на рисунке 4.

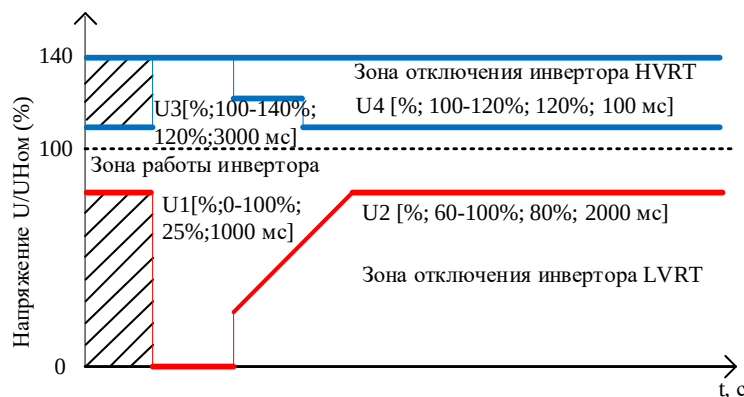


Рис. 4. Характеристики работы функций LVRT/HVRT инверторного преобразователя

Fig. 4: Performance characteristics of LVRT/HVRT functions of inverter converter

*Источник: [14] Source: [14].

Данные технологии являются перспективными в плане обеспечения потребителей выгодной и надежной электроэнергией. Они способствуют снижению потерь мощности в сети, улучшению показателей напряжения и частоты [32, 40]. Однако, несмотря на преимущества, возникают разные экономические и технические проблемы, если источники РГ не оптимально интегрированы в существующие сети [40]. Неправильно спланированная РГ приводит к увеличению токов короткого замыкания (ТКЗ), появлению колебаний напряжения, перенастройки систем управления и устройств релейной защиты (РЗ) [40], что в свою очередь, влияет на динамику всей сети [24].

Существующие решения оптимального размещения источников РГ решают не все проблемы. Даже при правильном размещении, РГ снижает надежность сети и правильную работу РЗ, которые зависят от типа, размера, количества этих источников и структуры сети, к которой они подключаются [35, 37]. Повышение ТКЗ, за счет дополнительной подпитки от РГ, может привести к повреждению оборудования при отказе устройств РЗ [35, 36], что приведет к серьезным последствиям.

Для того чтобы избежать негативные последствия, снижения надежности и безопасности всей сети [35, 38], а также возникновения дисбаланса активной и реактивной мощности [36], встает необходимость более детального анализа сетей 6-10 кВ, к которым предполагается подключение новых мощностей РГ [32]. Решение которых может заключаться в использовании различных методов, таких как: применения генетических алгоритмов, искусственной нейронной сети (ИНС), анализа всевозможных вариантов конфигурации сети [24, 32].

Величина ТКЗ зависит от множества параметров как самой сети, так и подключенной к ней РГ. Рассматривая традиционное построение РС, можно сделать вывод что большинство РС 6-10 кВ являются радиальными по своей структуре (рис. 5) [24, 36].

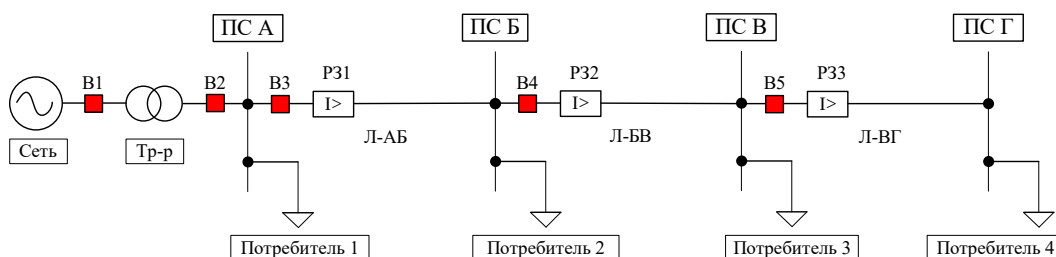


Рис. 5. Радиальная РС

Fig. 5. Radial distribution network

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

В таких сетях мощность протекает в одном направлении – от источника к потребителям, другими словами, такая сеть имеет однонаправленный поток мощности [24], а величина ТКЗ в месте повреждения обуславливается мощностью системы и сопротивлением элементов электрической сети (рис. 6).

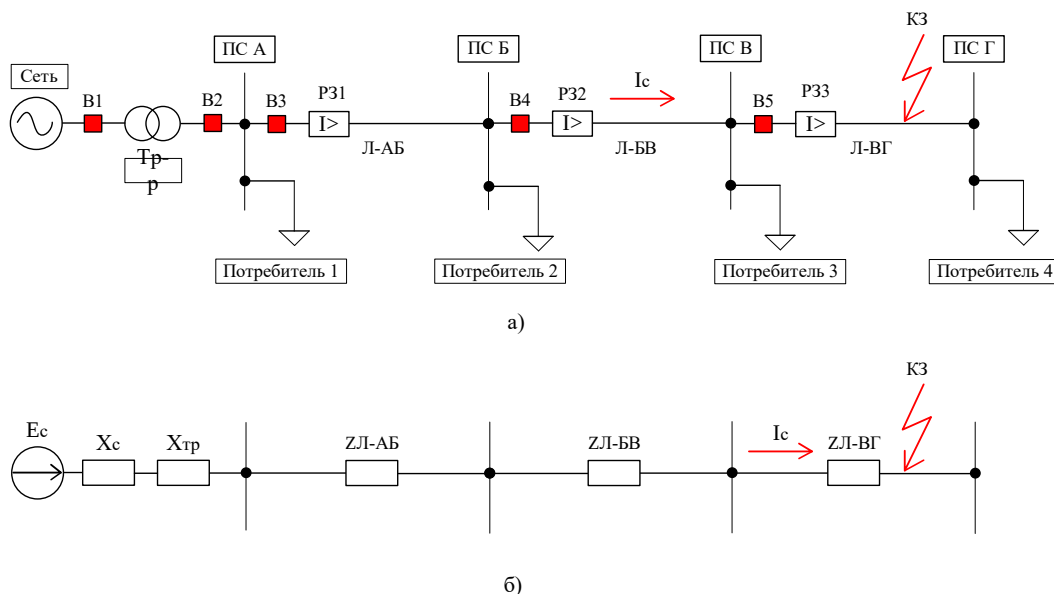


Рис. 6. КЗ на участке радиальной РС: а) условная схема РС; б) схема замещения РС

Fig. 6. Short-circuit in a section of a radial distribution network: a) conventional diagram of the distribution network; b) substitution diagram of the distribution network

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

РЗ в таких сетях имеет простую схему и выполняется в основном с использованием предохранителей, реклоузеров и МТЗ [7, 44]. Основной задачей защиты является обнаружение и устранение аварийных ситуаций [6, 35, 47], отделения неисправного участка сети от исправного, с целью бесперебойного снабжения электроэнергией и предотвращения развития масштабных повреждений в сети. Компоненты РЗ показаны на рисунке 7.

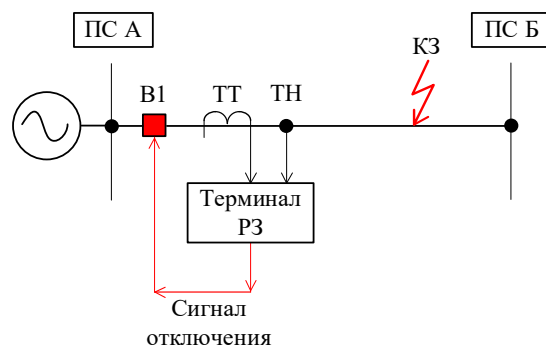


Рис. 7. Компоненты РЗ

Fig. 7. Components of relay protection

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

Терминал РЗ получает данные о токе и напряжении от измерительных трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН). На основе этих данных измерительные органы терминала определяют место и характер повреждения и принимают решения о необходимости действия защиты. При превышении уставки по току, возникновении КЗ, реагирует пусковой орган терминала РЗ, запускается алгоритм защиты и отправляется сигнал на отключение выключателя В1, изолируя аварийный участок РС.

Внедрение РГ изменяет структуру сети, она перестает быть радиальной. Наличие такого источника вносит дополнительный поток мощности, а при возникновении в ней неисправности, короткого замыкания (КЗ), приводит к увеличению ТКЗ [23, 24] (рис. 8). Величина которого, в данном случае, зависит от типа, мощности, количества и режима работы РГ [37, 47]. Значение тока подпитки места КЗ от одного небольшого блока РГ

невелик, что вносит незначительный вклад в величину ТКЗ, однако эта величина может существенно увеличиться при внедрении источников РГ большого количества и большей мощности [41, 44, 45], что может привести к повреждению силового оборудования, снижению надежности сети и неправильной работе устройств РЗ, требующих перерасчета уставок и дополнительного конфигурирования терминалов [23, 37, 44, 45]. Влияние РГ на сеть, а именно вклад в ТКЗ, подробно рассмотрено в работах [30, 41].

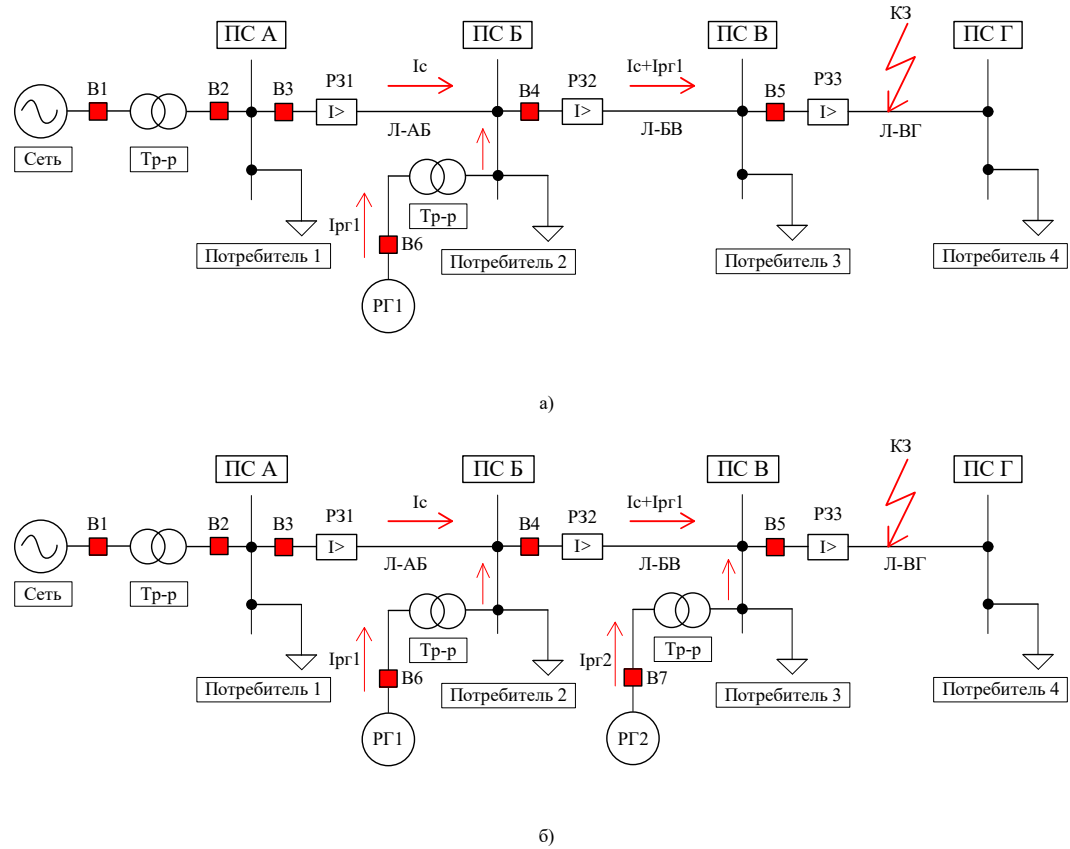
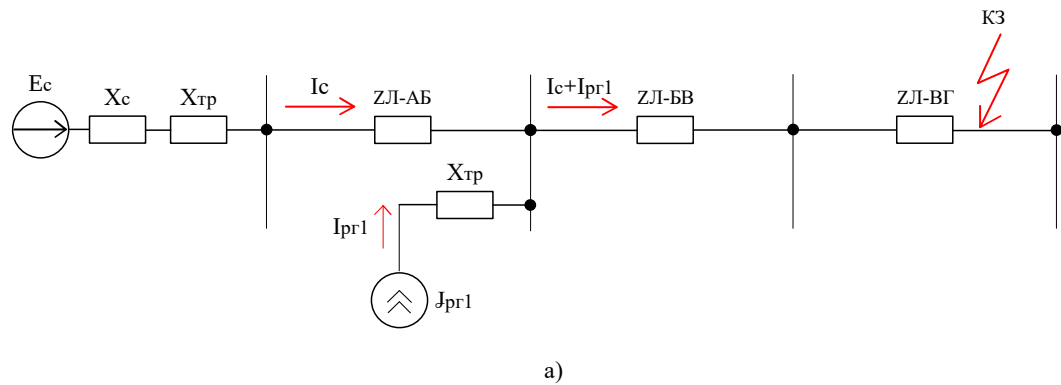


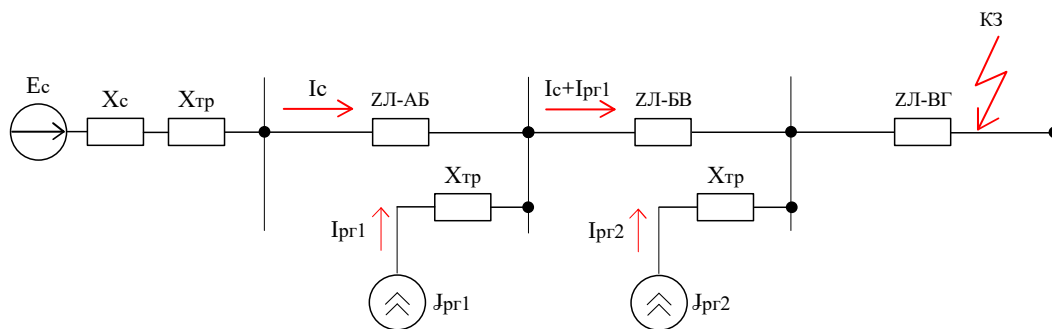
Рис. 8. Влияние источников РГ на ТКЗ: а) при внедрении одного источника РГ; б) при внедрении двух источников РГ

Fig. 8. Effect of distributed generation sources on short-circuit current: a) when one distributed generation source is introduced; b) when two distributed generation sources are introduced

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

Схема замещения при интеграции источников РГ в РС изображена на рисунке 9.





б)

Рис. 9. Схема замещения РС: а) при внедрении одного источника РГ; б) при внедрении двух источников РГ

Fig. 9. Distribution network substitution scheme: a) when implementing one source of distributed generation; b) when implementing two sources of distributed generation

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

К основным требованиям, обеспечивающим эффективное функционирование РЗ и обеспечение безопасности и надежности работы электроэнергетических систем, относят: селективность, чувствительность, быстродействие и надежность [6, 35]. Первое требование заключается в способности РЗ селективно реагировать на ТКЗ и автоматически отключать только поврежденный участок РС. Второе обязывает РЗ обладать достаточной чувствительностью к повреждениям и ненормальным режимам работы. Третье требование заключается в скорости срабатывания РЗ и отключения КА поврежденного участка для предотвращения дальнейших повреждений. Четвертым является надежность РЗ, чтобы обеспечить стабильную и эффективную защиту электрических сетей.

Рациональное использование этих параметров создает защиту, которая не только оперативно реагирует на аварии, но и избирательно отключает только те участки, которые действительно нуждаются в этом. Баланс между селективностью и чувствительностью достигается за счет правильной настройки временных и токовых уставок, другими словами, координации РЗ. Координация заключается в согласованности защитных устройств, их селективности чувствительности, она необходима для минимизации воздействия аварийного режима на РС и повышения ее надежности. К ней относятся определение временных и токовых уставок, учет кривых срабатывания тех или иных защит, для обеспечения гарантированного срабатывания РЗ, установленных ближе всего к месту повреждения, а в случае их отказа срабатывания вышестоящих [20, 35, 39, 44]. Координация РЗ выстраивается снизу вверх (рис. 10), другими словами, от потребителей электрической энергии к источнику сети. Неисправность устраняется путем отключения выключателя, на участке которого произошло КЗ. В этом случае сначала должен отключиться В5. При отказе В5 должен отключиться В4 и т.д. [6].

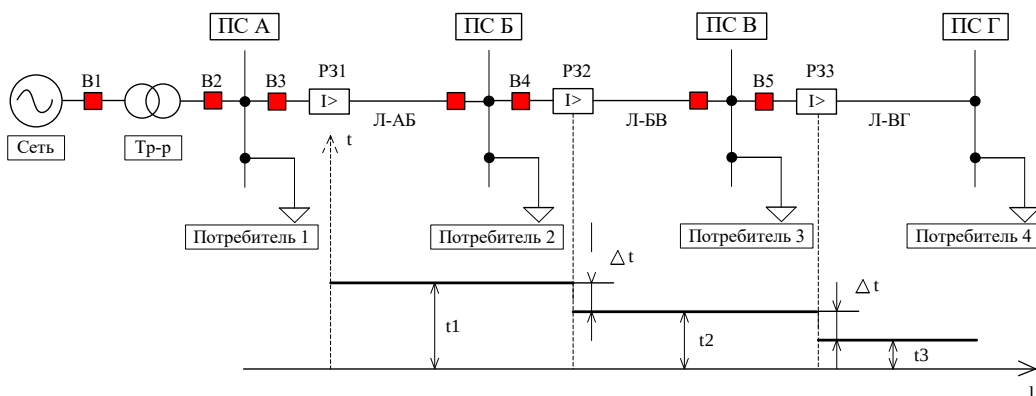


Рис. 10. Отстройка по времени релейной защиты участка РС

Fig. 10. Time delay of the relay protection of a distribution network section

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

Подключенная к основной сети РГ служит источником дополнительного потока мощности, а разработанная для радиальной сети РЗ становится нечувствительной и

ненадежной для новой структуры [1, 47]. За последние несколько лет нормативные документы касаемые построения и исполнения РЗ были адаптированы для работы с крупными объектами РГ и их подключения [18]. Однако, проблемы, возникающие при их внедрении, были не до конца решены. Так исполнение защиты отходящей линии с подключенными источниками РГ на основе ВИЭ представляют собой сложную задачу из-за низкого ТКЗ в изолированном режиме работы, изменения величины и направления тока в результате изменения топологии сети с несколькими источниками энергии [5, 43, 47], а также стратегии управления и непостоянстве ВИЭ. А использование направленного МТЗ требовало дополнительной координации с вышестоящими защитами [13, 39]. Влияние РГ на работу РЗ рассматривалось многими как отечественными коллегами, так и зарубежными. Изучив и проанализировав литературу, можно выделить несколько основных проблем, влияющих на работу защиты в РС.

Неселективное срабатывание: неселективное срабатывание защиты возникает на отходящем фидере с РГ при аварии на смежном участке (рис. 11), так как в точку КЗ начинает протекать ток подпитки от РГ, что в свою очередь, приводит к срабатыванию защиты и отключению неповрежденного фидера с РГ [18, 37, 41]. Происходит это в основном, когда источник РГ и точка КЗ находятся в непосредственной близости к ПС [35].

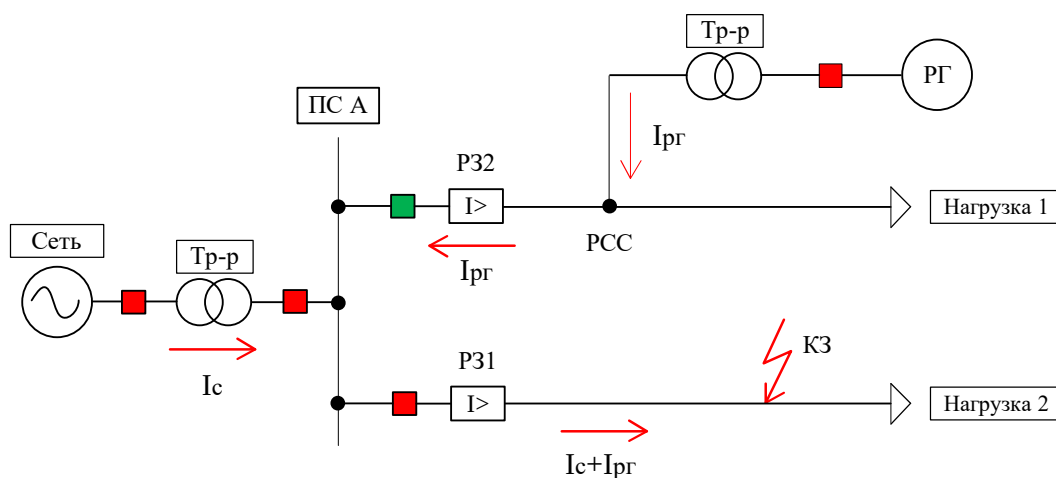


Рис. 11. Неселективное срабатывание P32

Fig. 11. Non-selective operation of P32

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

Снижение чувствительности РЗ: Интеграция источников РГ между устройством защиты и точкой КЗ уменьшает вклад основной сети в ТКЗ, что приводит к несрабатыванию P32 (рис. 12) [48]. Чувствительность защиты в данном случае снижается [35, 37, 41].

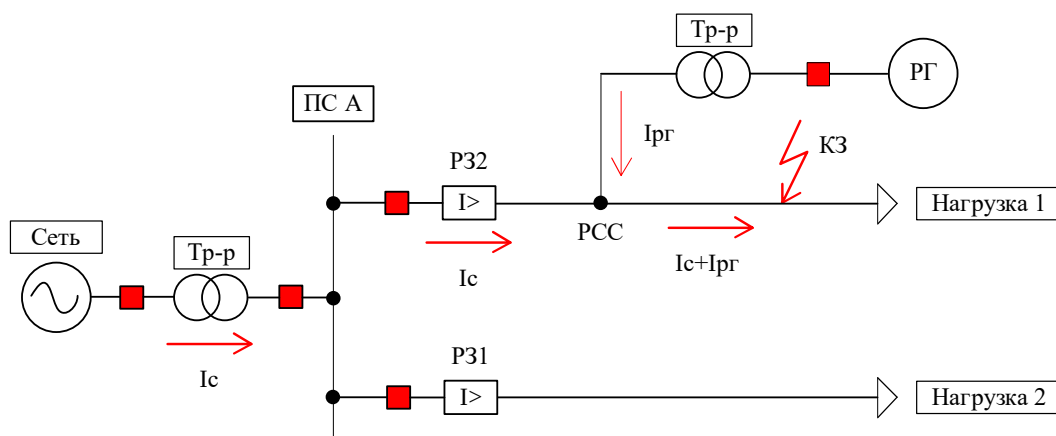


Рис. 12. Снижение чувствительности P32 [7, 48]

Fig. 12. Decrease in sensitivity of P32 [7, 48]

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

Рассматривая в качестве источников обычные синхронные машины можно сделать вывод что, в зависимости от Z_c/Z_{pr} , чем больше будет это соотношение, тем меньше будет вклад в величину K_3 от основной сети (рис. 13) [7, 48].

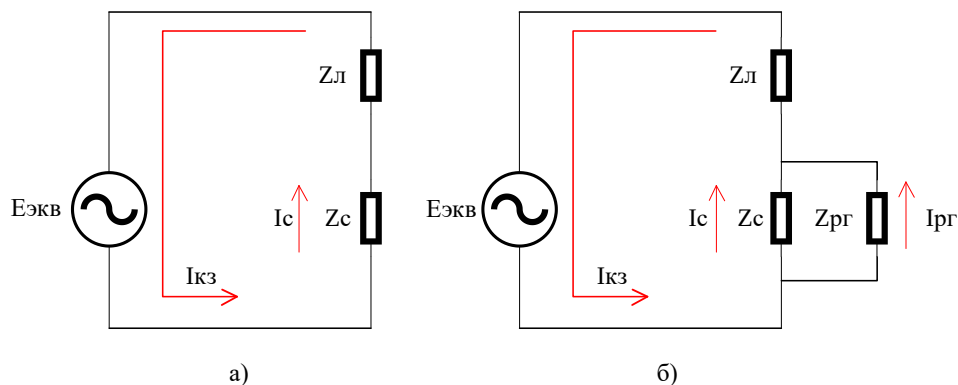


Рис. 13. Схема замещения участка РС: а) при отсутствии РГ; б) при наличии РГ [7]

Fig. 13. Substitution diagram of a distribution network section: a) in the absence of distributed generation; b) in the presence of distributed generation [7]

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

Картина с возобновляемыми источниками немного иная, поскольку они являются по своей природе реальными источниками тока. Внутреннее сопротивление таких источников непостоянна, которая может изменяться в зависимости от температуры, степени разряда и других факторов. Схема замещения участка РС при наличии в ней источника(-ов) на основе ВИЭ изображена на рисунке 14.

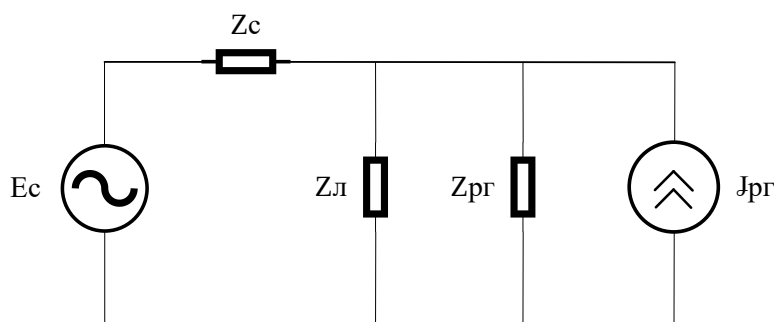


Рис. 14. Схема замещения участка РС при наличии РГ на основе ВИЭ

Fig. 14. Substitution diagram of the distribution grid section in the presence of distributed generation based on RES

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

Данную схему можно преобразовать до более упрощенного вида. Воспользовавшись известными методами преобразования и упрощения схем замещения, можно получить следующую схему (рис. 15).

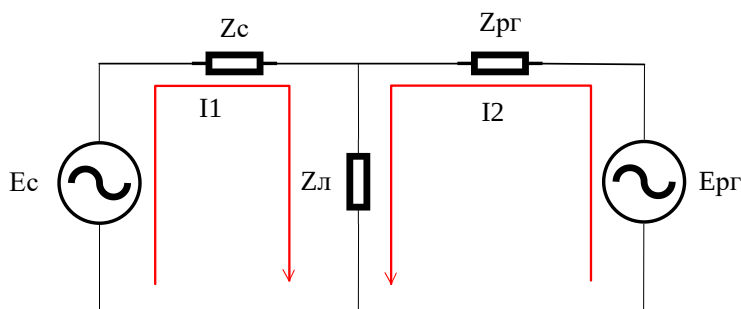


Рис. 15. Упрощенная схема замещения участка РС при наличии РГ на основе ВИЭ

Fig. 15. Simplified substitution diagram of a distribution network section in the presence of distributed generation based on RES

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

Проводя сравнение источников РГ на основе ВИЭ и синхронных генераторов, можно сделать вывод, что соотношение $Z_c/Z_{рг}$, в случае с возобновляемыми источниками, будет величиной непостоянной, зависящей от внутреннего сопротивления ВИЭ. Вклад в величину ТКЗ от таких источников будет зависеть как от внутреннего сопротивления, так и от пропускной способности самого инвертора.

Источники РГ могут работать в параллельном и изолированном режимах (рис. 16). Параллельный режим источников РГ подразумевает непосредственное их подключение к электрической сети. При этом они работают совместно с источниками основной сети, обеспечивая местное производство электрической энергии. Изолированный режим работы предполагает автономную работу источников РГ. В этом режиме работы РГ обеспечивает электроснабжение потребителей независимо от внешних источников [37]. Однако, величина тока в месте КЗ значительно отличается друг от друга. В параллельном режиме ТКЗ является суммой токов как основной сети, протекающего от источников данной сети и зависящего от их мощности, так и тока подпитки от источников РГ. В изолированном же режиме ТКЗ ограничивается лишь током объекта РГ и пропускной способностью инвертора (при его/их наличии) [47]. В работе [37], авторы утверждают, что величина пропускной способности самого инвертора в 2-3 раза превышает его номинальное значение. В [43], ток, проходящий через инвертор, ограничен на 150% от его номинала. А в статье [47], приходят к выводу, что максимальный ток КЗ от РГ не более чем в два раза превышает номинальный ток инвертора. С другой стороны, наличие в сети РГ с синхронными генераторами (СГ) вносят вклад в ТКЗ, превышающее его номинальный ток в десять раз [43, 47].

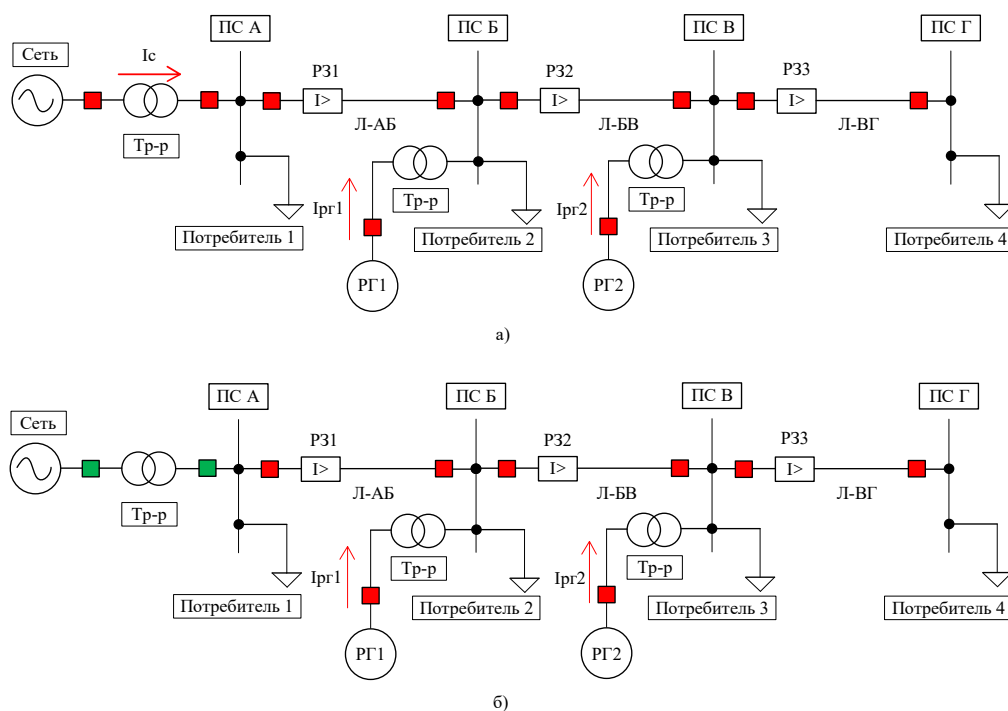


Рис. 16. Режимы работы РГ: а) параллельный режим; б) изолированный режим

Fig. 16. Operation modes of distributed generation: a) parallel mode; b) isolated mode

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

Изолированный режим происходит, когда часть или участок РС, содержащая нагрузку и источники РГ, становится изолированной от основной сети, при этом питание потребителей осуществляется за счет оставшихся в работе источников РГ [16, 18, 47]. Стандарт 1547 Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) определяет изолированный режим как ситуацию, при которой распределительная система, будучи изолированной от основной сети, продолжает получать питание от источников распределенной генерации [21]. Согласно этому стандарту РГ должна быть изолирована при возникновении в сети любого типа неисправности [47]. При переходе в изолированный режим, РГ может поддерживать питание потребителей (в зависимости от мощности установки и топологии сети) [18], тем самым повышая надежность участка РС, что является главным преимуществом этого режима [47]. По ряду технических и экономических причин, а также в целях безопасности, данный режим ранее нигде не применялся [18], поскольку

требовал перенастройки устройств РЗ и разработки адаптивных защит, способных работать как в нормальном, так и в изолированном режимах [24].

Изолированный режим может быть преднамеренным или непреднамеренным. Непреднамеренный переход в изолированный режим может возникнуть в случае возникновения неисправности в сети, при этом часть РС будет снабжаться электроэнергией от источников РГ, где длительность работы такого режима зависит от баланса активной и реактивной мощности этого участка. Если совокупная генерируемая мощность всех РГ будет меньше мощности потребителей, участвующих в изолированном режиме, то период времени работы такого режима должен быть минимальным [1, 16]. Такой режим можно обнаружить с помощью частотно-зависимой функции, которая встраивается в инвертор и является обязательной [37]. Однако, если соблюдается баланс между генерирующей и потребляющей мощностью, то работа РГ может продолжаться в автономном режиме и снабжать электроэнергией потребителей [1, 16].

Основные проблемы изолированного режима связаны с необходимостью поддержания стабильных параметров электрической энергии, обеспечения резервной мощности, синхронизации нескольких источников энергии и применения специальных систем управления и защиты. К этим проблемам относятся:

1. Обеспечение стабильности напряжения и частоты [4, 34]:

В изолированном режиме необходимо поддерживать стабильные параметры электроэнергии (напряжение, частоту) при изменяющейся нагрузке, что требует специальных систем управления.

2. Обеспечение резервной мощности [4, 34]:

Для надежного электроснабжения в изолированном режиме необходимо иметь достаточный резерв генерирующей мощности на случай аварийных ситуаций или ремонтов.

3. Синхронизация работы нескольких источников энергии [4, 34]:

При работе нескольких источников в изолированном режиме требуется их точная синхронизация по частоте и фазе для предотвращения перегрузок и аварий. В противном случае, источники РГ должны будут отключиться, чтобы избежать повреждения устройств [37], отклонения частоты, напряжения и появления высших гармоник в сети.

4. Ограничения по мощности и количеству потребителей [4]:

Изолированные системы распределенной генерации, как правило, имеют ограничения по максимальной мощности и количеству подключаемых потребителей.

5. Необходимость специальных систем управления и защиты [4, 34].

Непреднамеренный или непредусмотренный переход в изолированный режим: Переход в изолированный режим сопровождается снижением чувствительности и надежности как направленной, так и ненаправленной МТЗ [43], используемой в качестве основной защиты (рис. 17) [47]. ТКЗ в таком режиме намного ниже, по сравнению с параллельной работой. При возникновении КЗ, ток, протекающий к точке КЗ, не способен превысить порог срабатывания РЗ1, что приводит к ее несрабатыванию. В этом случае требуется перерасчет уставок МТЗ или использование второй группы, уже заранее сконфигурированной в устройстве. Этот режим также может привести к несинхронизированному АПВ, что накладывает на себя дополнительные проблемы. Для этого рекомендуется повысить уставку времени срабатывания данной автоматики, чтобы отстроится от защиты от изолированного режима, и использовать АПВ с синхронизмом [18].

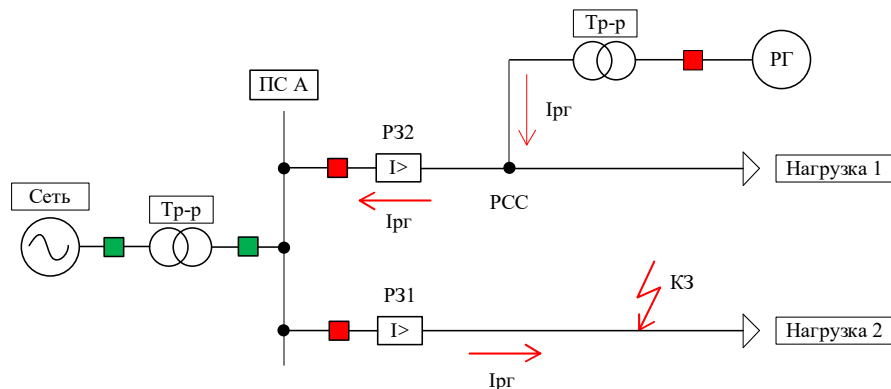


Рис. 17. Отказ P31 при КЗ в изолированном режиме

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

Исходя из вышеперечисленного, возникает необходимость в пересмотре алгоритмов традиционной релейной защиты, построенной на токовых защитах, и дополнения ее новыми методиками и алгоритмами, поскольку интеграция источников РГ усложняет режимы работы распределительной сети и как следствие координацию РЗ [43]. А в качестве решения этих проблем могут способствовать использование искусственного интеллекта, например нейронных сетей, адаптивных защит и алгоритмов, способных вести расчет уставок РЗ при различных динамических изменениях сети и передавать эти значения в устройства защиты [1, 7, 39].

Для обеспечения устойчивой работы в изолированном режиме требуются специальные системы противоаварийной автоматики, релейной защиты и управления. К ним можно отнести системы мониторинга и диагностики, обеспечивающие непрерывный мониторинг параметров сети, источников РГ и нагрузки, усовершенствованные системы РЗ или адаптивные РЗ.

В статье [1] предлагается алгоритм адаптивной защиты, основанный на сборе локальной информации. Проводимый эксперимент заключается в анализе напряжения и токов прямой последовательности, протекающих через устройство защиты для выявления неисправностей, что позволяет снизить количество неселективных срабатываний и повысить селективность защиты.

В алгоритме используется следующая формула для расчета уставки токовой защиты [1]:

$$I_{уст} = \frac{K_n \cdot K_{неиспр} \cdot E_\phi}{Z_c + Z_\lambda}$$

где K_n — коэффициент надежности, $K_{неиспр}$ — коэффициент, зависящий от типа неисправности, E_ϕ — эквивалентное фазное напряжение системы, Z_c — суммарное сопротивление со стороны питания системы, Z_λ — сопротивление защищаемой линии.

Если точка неисправности находится выше точки подключения РГ (рис. 18), поток данных не меняется, и текущие алгоритмы защиты работают эффективно.

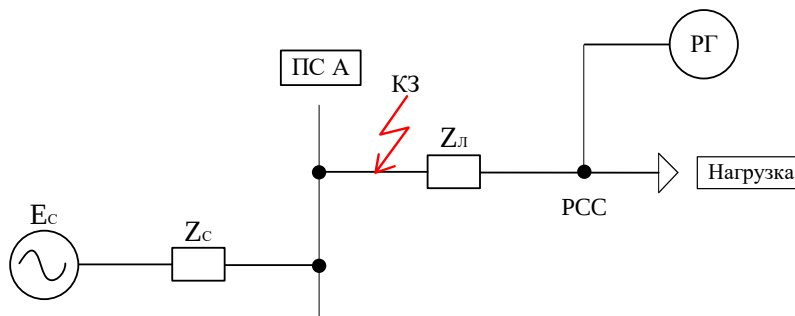


Рис. 18. Короткое замыкание выше точки подключения РГ к сети

Fig. 18. Short circuit above the point where distributed generation is connected to the grid

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

Однако если неисправность происходит ниже точки подключения РГ (рис. 19), возникает необходимость в адаптации конфигурации уставок защиты, поскольку генерация мощности от РГ может повлиять на величину короткого замыкания и изменить параметры сети.

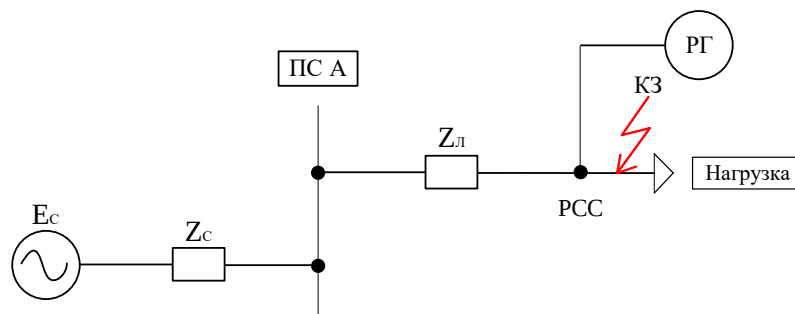


Рис. 19. Короткое замыкание ниже точки подключения РГ к сети

Fig. 19. Short circuit below the point where distributed generation is connected to the grid

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

После многократного моделирования, авторы сделали вывод, что предложенный ими алгоритм адаптивной токовой защиты обеспечивает эффективное решение для защиты сетей с распределенными источниками энергии. Основные преимущества заключаются в его способности адаптироваться к пороговым значениям обеспечения защиты в зависимости от условий сети, что значительно повышает ее селективность и надежность.

В работе [18] было рассмотрено влияние РГ различной мощности на защиту сетей низкого, среднего и высокого напряжения. При интеграции РГ малой мощности нарушение защиты минимального напряжения прямой последовательности (ANSI 27D), защиты минимального напряжения (ANSI 59), защиты минимального напряжения нулевой последовательности (ANSI 59N), защиты максимальной и минимальной частоты (ANSI 81H и ANSI 81L) не наблюдалось.

Анализ существующих защит, применяемых на объектах электроэнергетики, был приведен в работе [43]. На примере тестовой системы небольшого участка РС (рис. 20), авторы описывают основные проблемы защит отходящих линий при наличии в РС источников РГ.

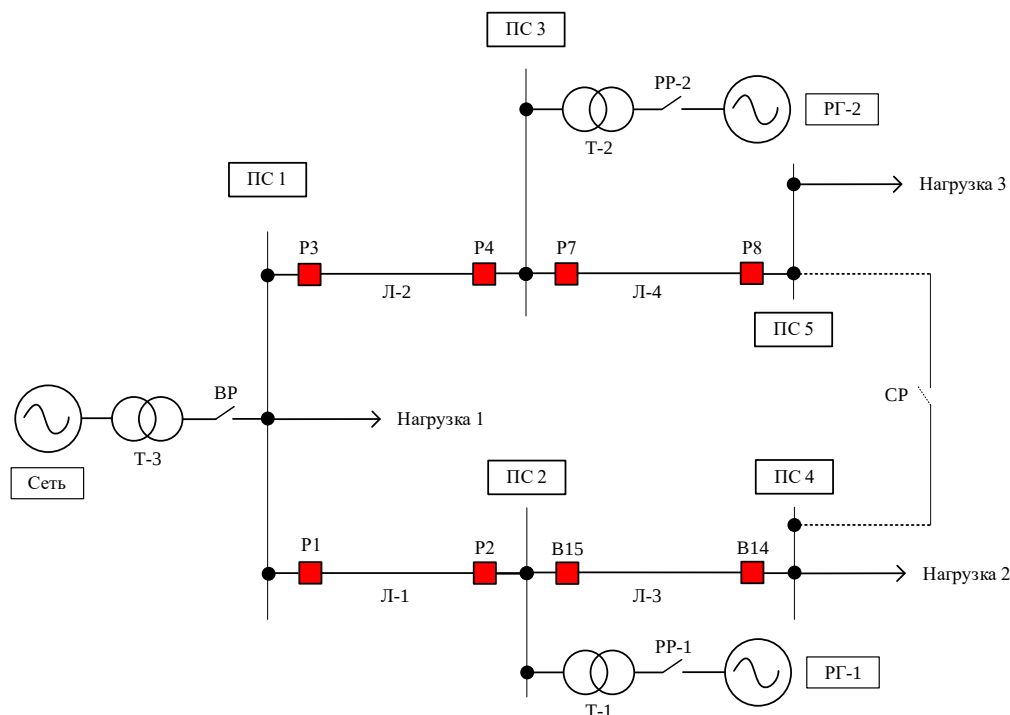


Рис. 20. Тестовая системы участка РС [43]

Fig. 20. Distribution network section test system [43]

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

К этим защитам можно отнести как защиты традиционного исполнения, так и защиты, работа которых основана на новых методиках и алгоритмах. Так, отсутствие надежной адаптивной логики работы МТЗ приводит к несрабатыванию защиты при возникновении КЗ в изолированном режиме, а также нарушению чувствительности из-за дополнительного потока мощности со стороны РГ. Схема защиты на основе вейвлет-преобразования не способна различить переходные процессы нормального и аварийного режимов работы. Эффективность дистанционной защиты и защиты на основе бегущей волны снижается с уменьшением длины ЛЭП и становится непригодной для сетей с короткими линиями. Адаптивные защиты, основанные на центральном процессоре более требовательны к своим внутренним характеристикам, и зависят от мощности, а при возникновении сбоя в каком-либо узле или точке приводят к выводу из строя всю защиту. Интеллектуальные схемы защиты требуют построения высокого уровня коммуникационной сети – наличие выделенной сети с цифровым обменом данных. Недостатком при применении дифференциальной защиты является нарушение синхронизации данных – частоты дискретизации, поскольку возникающий при этом ток небаланса может неправильно повлиять на работу самой защиты. Схемы защиты на основе классификаторов данных склонна к избыточной подгонке данных и может выдавать неверные решения, если обучена на необъективном наборе данных. Сложность алгоритмов такой работы слишком высока, поэтому является нецелесообразной к применению в небольших РС.

Проводя анализ традиционных методов защит отходящих линий в РС, авторы в своей работе [49] предложили использование дифференциальной защиты как основной. Дифференциальная защита действует при возникновении неисправности внутри защищаемого участка, и не реагирует на внешние, даже при наличии в РС источников РГ. Применение данной защиты предотвращает ложные срабатывания (отключения) при неисправностях на смежных отходящих линиях, а также отлично выполняет свою работу в изолированном режиме работы РС, по сравнению с другими традиционными защитами [49]. Однако к недостаткам данного метода можно отнести потерю надежности при замыканиях на землю, которая происходит значительное изменение токов неповрежденной фазы из-за низкоомного сопротивления нулевой последовательности, в то время как инвертор действует как слабый источник прямой и обратной последовательности [50]. Также к недостаткам можно отнести дороговизну применения данного метода и необходимость в надежном канале связи для его корректной работы.

В работе [46], автор провел обзор токовых реле с независимой характеристикой и с сильно-инверсной характеристикой при использовании их в РС с участием и без участия источников РГ. Как известно, время работы токового реле с независимой характеристикой определяется лишь задаваемой уставкой по времени, с учетом согласования от нижестоящих защит. В то время как время работы токового реле с сильно-инверсной характеристикой определяется по следующей формуле:

$$t = \frac{\beta \cdot K}{\left(\frac{I}{I_{с.з.}}\right)^{\alpha} - 1}$$

где K , α , β – определенные коэффициенты, I – ток, протекающей через реле, $I_{с.з.}$ – ток срабатывания защиты. Чем больше величина тока будет протекать через токовое реле, тем быстрее сработает защита и подаст сигнал на отключение выключателя, и наоборот. Пример использования токовых реле с независимой и сильно-инверсной характеристиками изображен на рисунке 21.

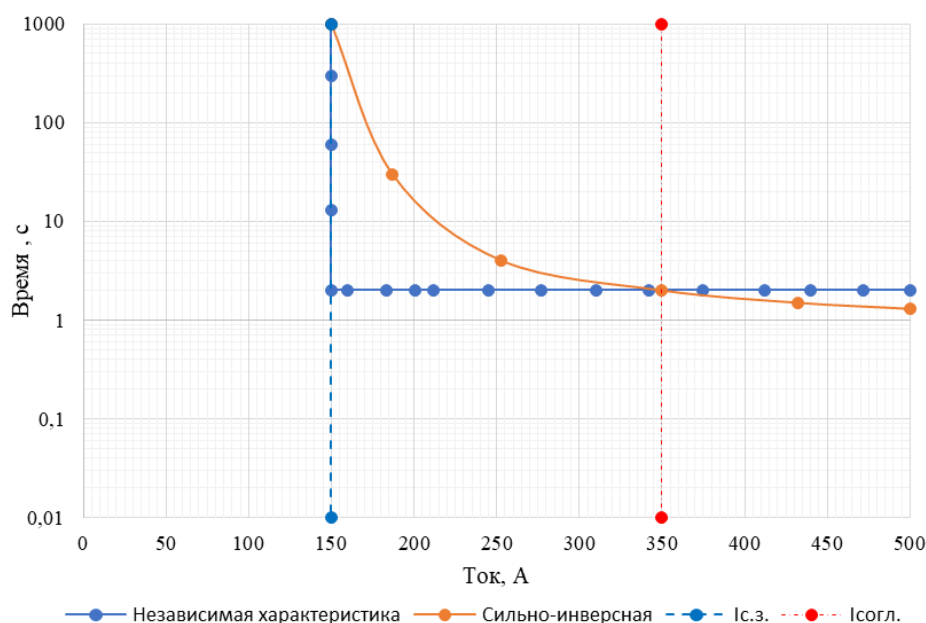


Рис. 21. Карта селективности токовых защит с независимой характеристикой и сильно-инверсной характеристикой

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

В своей работе автор рассмотрел 3 варианта координации защиты: 1) защита РС без источников РГ; 2) защита РС с наличием в ней источников РГ; 3) защита участка РС, находящегося в изолированном режиме при наличии источников РГ и АКБ. Однолинейная схема РС изображена на рисунке 22.

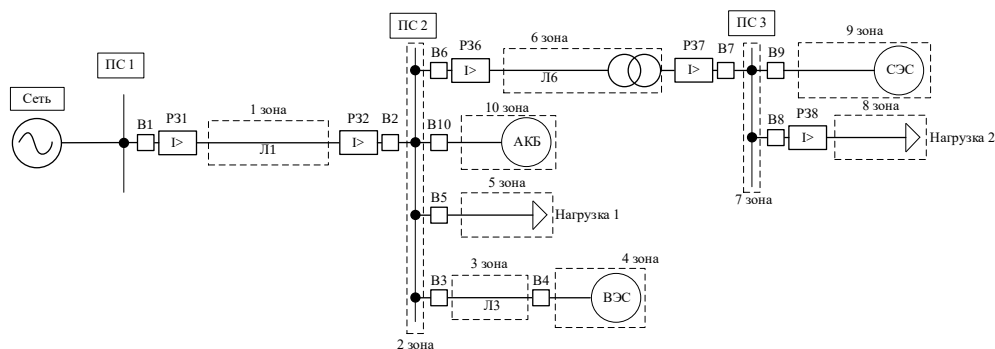


Рис. 22. Однолинейная схема РС

Fig. 22. Single-line diagram of the distribution network

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

В первом варианте при КЗ в зонах 1 и 6 лучшее время отключения и сохранение координации между основной и резервной защитой обеспечила токовая защита с сильно-инверсной характеристикой, однако при КЗ в зоне 8 наилучшие результаты показала токовая защита с независимой характеристикой на всех участках РС, кроме резервной токовой защиты Р31, время срабатывания которой больше 18 секунд (рис. 23) [46].

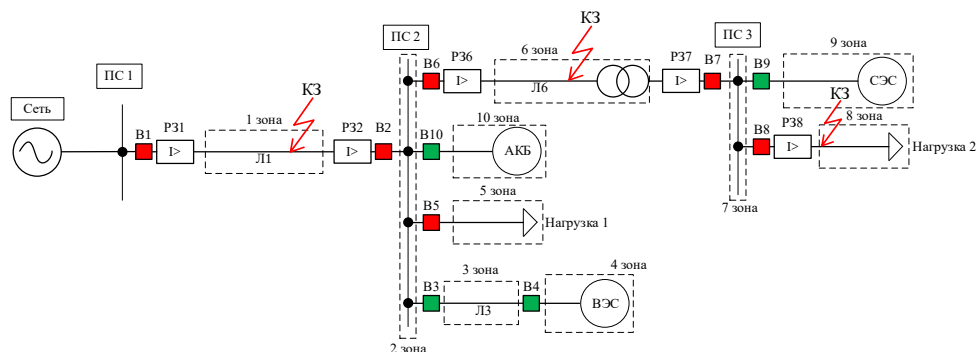


Рис. 23. Однолинейная схема РС без участия источников РГ

Fig. 23. Single-line diagram of the distribution network without distributed generation sources participation

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

Во втором варианте, когда к сети добавились источники ВИЭ и АКБ, картина при КЗ в зонах 1 и 6 остается такой же, как и в первом варианте. Сравнивая 1 и 2 вариант, можно сказать, что включение источников РГ уменьшает вклад в ток КЗ от основной сети из за чего при КЗ в зоне 8 токовые реле с сильно-инверсной характеристикой Р32, 6, 7 срабатывают уже с более большим временем и обеспечивают меньшую координацию по сравнению с токовыми реле с независимой характеристикой. Однако, при КЗ в зоне 8, время срабатывание Р38 сильно-инверсной характеристикой уменьшается за счет дополнительного тока подпитки со стороны СЭС (рис. 24) [46].

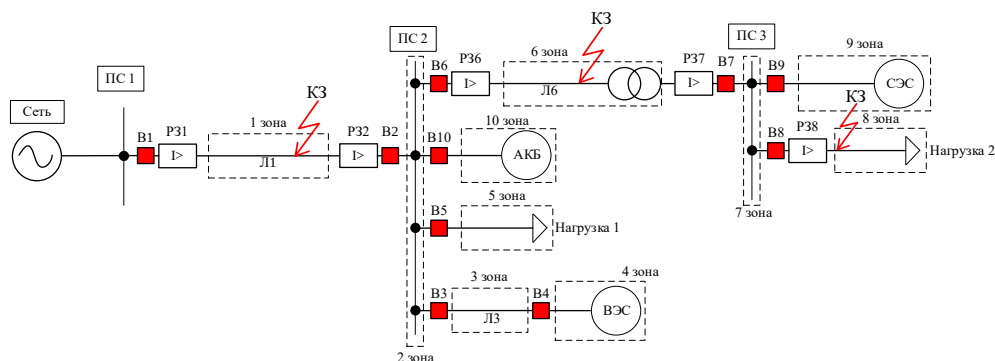


Рис. 24. Однолинейная схема РС с участием источников РГ

Fig. 24. Single-line diagram of the distribution network with participation of distributed generation sources

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

В третьем варианте, в связи с малыми токами КЗ со стороны источников РГ, время срабатывания основной и резервной токовой защиты с сильно-инверсной характеристикой довольно большое, что обеспечивает плохую координацию защиты в РС. В данном случае наиболее быстродействующей является токовая защита с независимой характеристикой (рис. 25) [46].

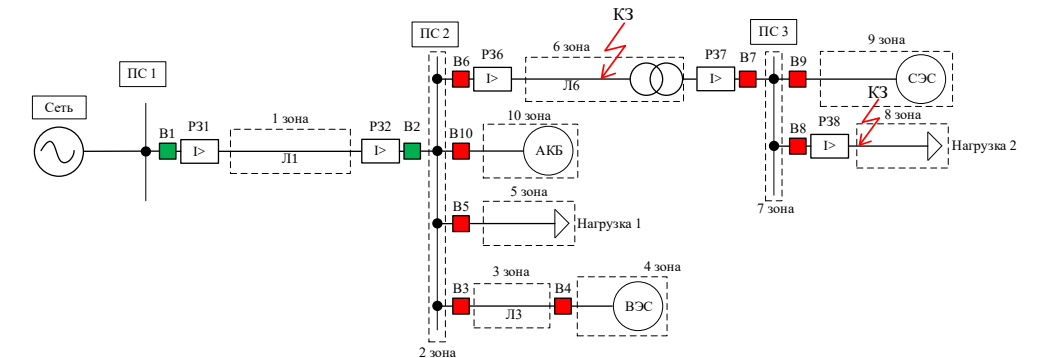


Рис. 25. Изолированный режим работы РС *Fig. 25. Isolated operation mode of the distribution network*
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Отсюда следует, что существующие решения не обеспечивают гарантированную защиту РС от различных неисправностей, возникающих на разных участках сети, а для их эффективной защиты требуется использование адаптивных методов защиты, которые могут настраиваться в зависимости от текущих условий работы сети. Это обеспечивает не только надежность и селективность защиты, но и минимизацию сбоев в работе системы. Ниже приведены таблицы с временем срабатывания токовых защит с сильно-инверсной и независимой характеристиками в трех рассматриваемых вариантах:

Таблица 3
Table 3

Координация защиты РС без источников РГ Coordination of protection of DN without sources of DG				
Точка КЗ	Устройство РЗ	Основная/ резервная РЗ	Сильно-инверсная характеристика, с	Независимая характеристика, с
1 зона	P31	Основная	0,6843	0,8
6 зона	P36	Основная	0,0732	0,4
	P32	Резервная-1	0,377	0,6
	P31	Резервная-2	0,765	0,8
8 зона	P38	Основная	0,1368	0,04
	P37	Резервная-1	0,4125	0,2
	P36	Резервная-2	0,7187	0,4
	P32	Резервная-3	6,9592	0,6
	P31	Резервная-4	>18	>18

*Источник: [46] Source: [46].

Таблица 4
Table 4

Координация защиты РС без источников РГ Coordination of protection of DN without sources of DG				
Точка КЗ	Устройство РЗ	Основная/ резервная РЗ	Сильно-инверсная характеристика, с	Независимая характеристика, с
1 зона	P31	Основная	0,7068	0,8
6 зона	P36	Основная	0,0732	0,4
	P32	Резервная-1	0,348	0,6
	P31	Резервная-2	0,7917	0,8
8 зона	P38	Основная	0,1277	0,04
	P37	Резервная-1	0,412	0,2
	P36	Резервная-2	0,7175	0,4
	P32	Резервная-3	8,5675	0,6
	P31	Резервная-4	>18	>18

*Источник: [46] Source: [46].

Координация защиты РС в изолированном режиме
Coordination of DN protection in isolated mode

Точка КЗ	Устройство РЗ	Основная/резервная РЗ	Сильно-инверсная характеристика, с	Независимая характеристика, с
6 зона	РЗ6	Основная	0,6163	0,4
8 зона	РЗ8	Основная	0,1977	0,04
	РЗ7	Резервная-1	0,761	0,2
	РЗ6	Резервная-2	1,361	0,4

*Источник: [46] Source: [46].

В статье [27] рассматривается эксперимент по разработке и созданию адаптивной системы защиты для распределительных сетей среднего напряжения (MV) с использованием стандарта IEC 61850. В качестве основного протокола обмена данными в системе защиты используются GOOSE и MMS, которые обеспечивают быструю передачу данных для функций защиты и переконфигурации. В качестве функции релейной защиты используется локализация и изоляция аварийной ситуации (FLISR). Эта система разработана с ограничением автоматической локализации аварийной ситуации, что позволяет быстро находить участки сети с короткими замыканиями или другими проблемами. А после обнаружения неисправного участка система изолирует его и обеспечивает электроснабжение на всех участках сети. Пример упрощенной схемы подстанции с двумя отходящими фидерами до возникновения КЗ и после с применением FLISR изображен на рисунке 26.

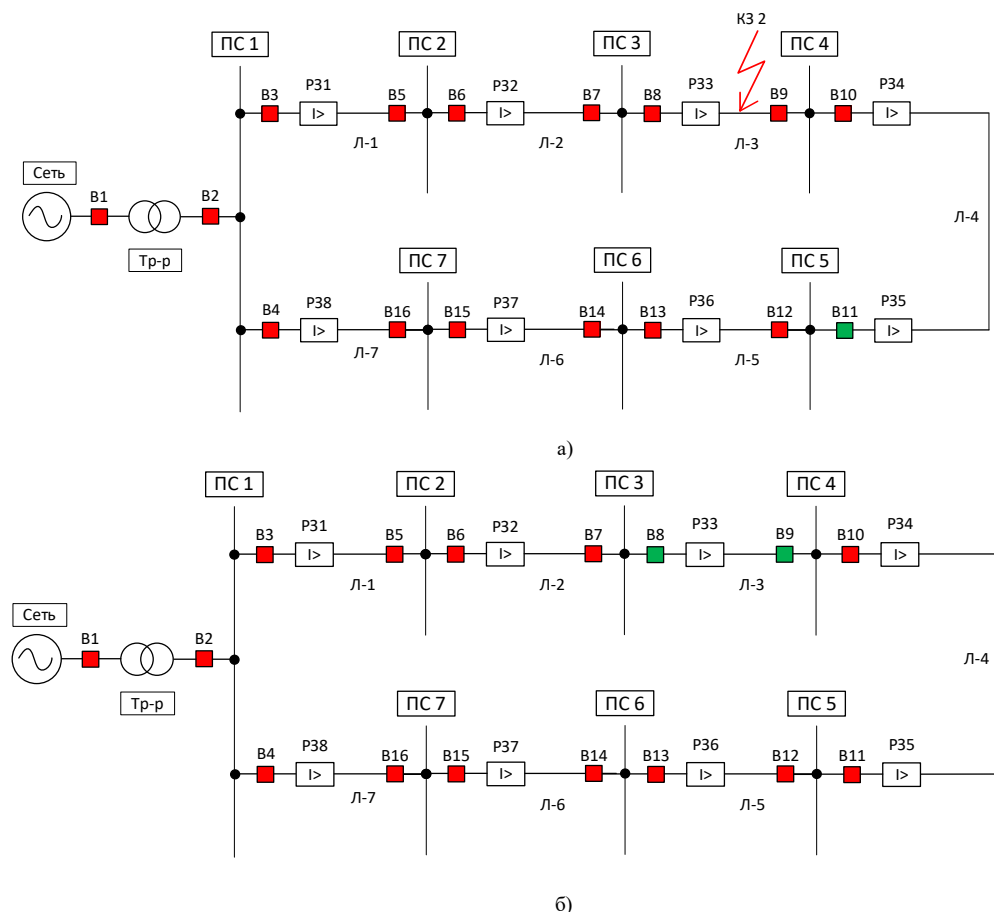


Рис. 26. Упрощенная схема подстанции с двумя отходящими фидерами: а) до короткого замыкания; б) после короткого замыкания [27]

Fig. 26. Simplified diagram of a substation with two output feeders: a) before the short circuit; b) after the short circuit [27]

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

В этой традиционной сети функция FLISR будет работать исправно, однако ситуация меняется при интеграции в нее источников ПГ, что, в свою очередь, требует перенастройки уставок РЗ (PSR) из-за повышения токов КЗ и изменения топологии сети. PSR – это функция, которая обеспечивает гибкость и позволяет устройствам защиты быстро

реагировать на изменения в сети. При включении основной сети (например, при отключении линии для обслуживания или подключения источника новой генерации) система автоматически адаптирует настройки релейной защиты для новой конфигурации.

В работе [5] проводилось исследование влияние РГ на релейную защиту распределительной сети. Моделируемая сеть представляла собой распределительную сеть напряжением 10 кВ, включающую 13 узлов, к которым подключены различные потребители. К сети были подключены две фотоэлектрические системы (PV1 и PV2) общей мощностью 1566 кВА. Модель была создана для исследования реальной системы с учетом характеристик генераторов, линий и устройств релейной защиты (рис. 27).

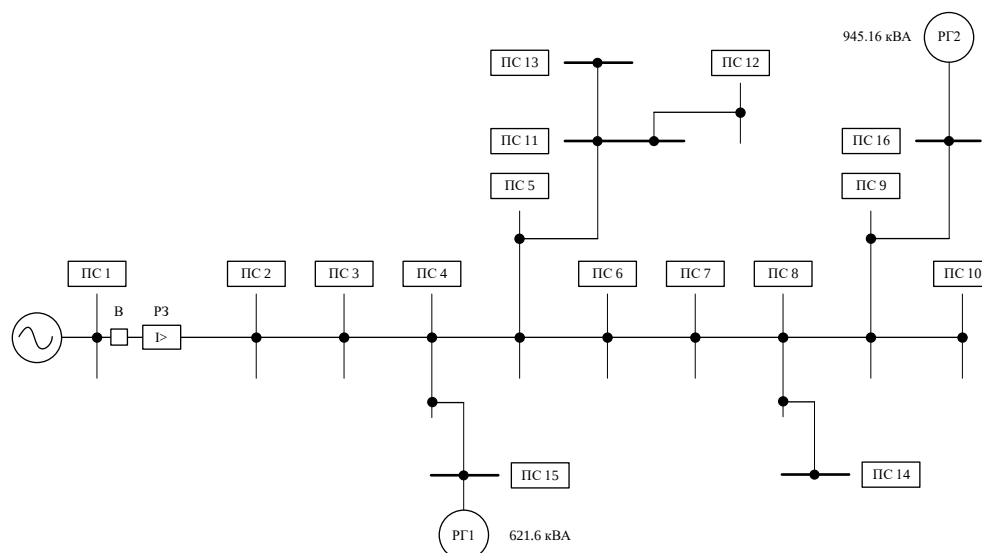


Рис. 27. Модель РС с источниками РГ [5]

Fig. 27. Distribution network model with distributed generation sources [5]

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

При увеличении количества подключаемых источников РГ к РС ток короткого замыкания в точке установки защиты существенно снизился. Например, при наличии РГ, переходное сопротивление которого составляет 10 Ом, ток короткого замыкания уменьшился на 8,6%. Ток короткого замыкания зависит от местоположения генерации, чем дальше распределенная генерация находится от релейной защиты, тем больше влияние на токи короткого замыкания, особенно при высоком переходном сопротивлении.

Одной из ключевых задач эксперимента было выяснение того, как изменяются параметры срабатывания защиты при наличии РГ. Выяснилось, что с уменьшением тока короткого замыкания работа защиты становится менее надежной, особенно в случае с двухфазными короткими замыканиями на землю (рис. 28), где защита может не сработать должным образом.

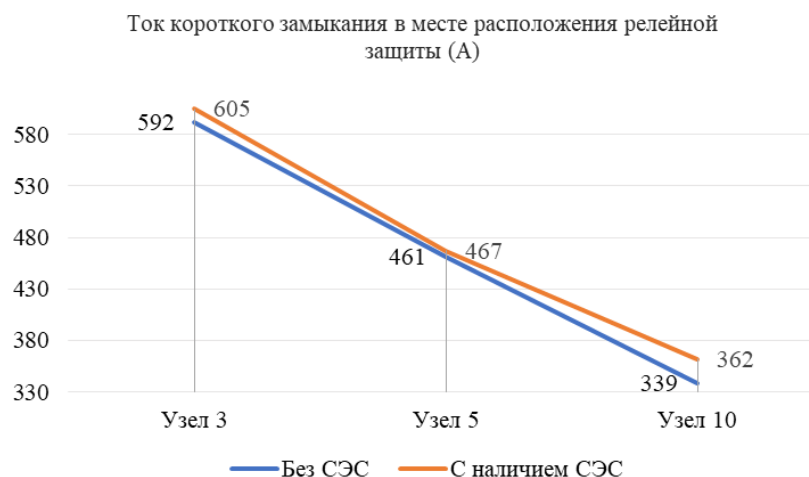


Рис. 28. Двухфазные КЗ [5]

Fig. 28. Two-phase short circuits [5]

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

В случае трехфазных КЗ на линии с переходным сопротивлением 10 Ом токи КЗ были достаточно низкими, чтобы токовая отсечка (ТО) не сработала. Для защиты с автоматическим повторным включением (АПВ) было установлено, что при наличии РГ возникает риск неселективных срабатываний или отказов РЗ. Это вызвано остаточными токами и напряжениями на линии после короткого замыкания, что может нарушить чувствительность РЗ.

Одним из требований по улучшению защиты является необходимость адаптации работы релейных устройств для работы с распределенной генерацией и регулярное обновление уставок защиты в зависимости от текущего уровня генерации в сети.

Эксперимент в работе [6] был направлен на анализ СЭС в работе РЗ РС, в частности на ее координацию при различной величине солнечного излучения. Основным фактором было изучение изменений, происходящих в работе РЗ при повышении уровня СЭС в сети. На рисунке 29 представлена исследуемая модель РС с источниками РС.

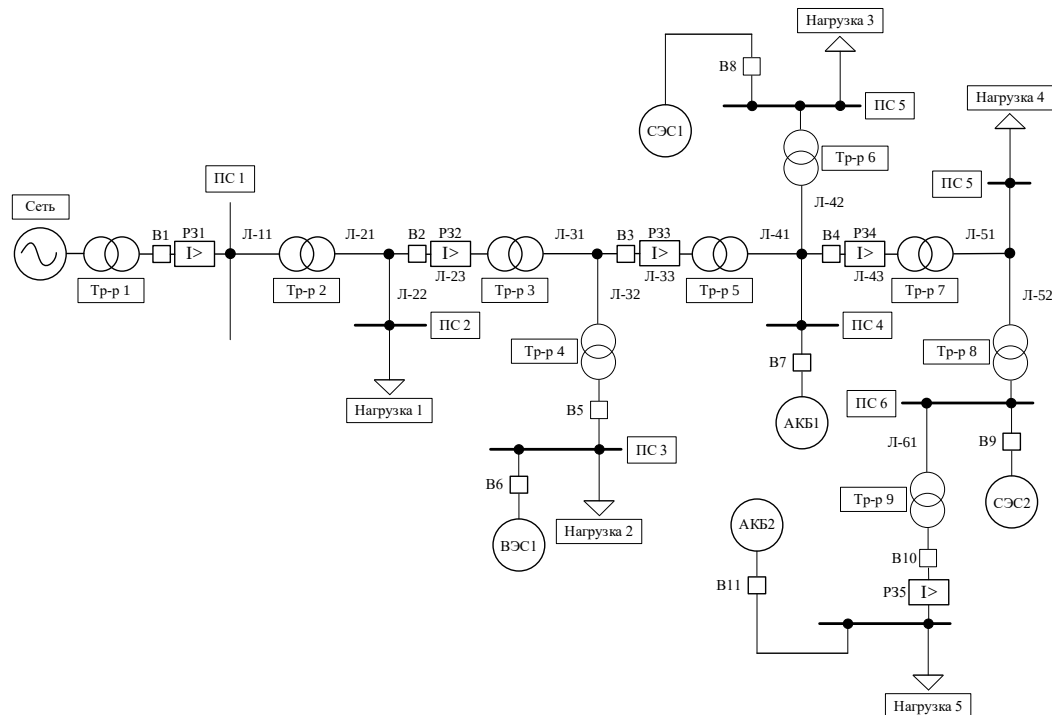


Рис. 29. Модель РС с источниками РГ [6]

Fig. 29. Distribution network model with distributed generation sources [6]

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

На первом этапе исследования проводилось без подключения СЭС, чтобы получить базовые значения токов короткого замыкания и времени срабатывания РЗ. Это изменение создаёт эталон для последующего сравнения с сетями, включающими СЭС. На следующем этапе были подключены СЭС различной мощности (от 10% до 62%). Проводились симуляции коротких замыканий, как со стороны системы, так и на участках РС. Основная задача – проверить, как изменяются токи короткого замыкания и координация РЗ при увеличении мощности солнечной генерации.

В сетях среднего напряжения наблюдалось увеличение времени срабатывания релейной защиты при интеграции СЭС выше 30%. Это связано с тем, что на таком уровне генерации координация традиционной РЗ перестает работать эффективно. При уровне интеграции в 62% происходит снижение чувствительности защиты, что обусловлено низкими токами КЗ со стороны системы, величина которых зависит от отношения сопротивления системы и сопротивления источника РГ (аналогично рис. 15). Коэффициент токораспределения в данном случае определяется следующим образом:

$$K_{\text{ток.р.}} = \frac{I_2}{I_1}$$

где I_1 — ток, протекающий со стороны системы, I_2 — ток, протекающий со стороны источника РГ.

Если привести ЭДС двух источников к напряжению 6-10 кВ $E_c = E_{p\Gamma}$, то с помощью математических преобразований можно получить следующее выражение:

$$K_{\text{ток.р.}} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{E_{p\Gamma}}{Z_{p\Gamma}} \div \frac{E_c}{Z_c} = \frac{Z_c}{Z_{p\Gamma}}$$

Отсюда следует, что при $K_{\text{ток.р.}} > 1$, вклад в величину тока КЗ со стороны будет уменьшаться.

В работе [10] проведен анализ работы защит ANSI 67/67N (направленной максимальной токовой защиты в фазах и направленной максимальной токовой защиты от замыкания на землю) и их использование в кольцевой РС по стандарту МЭК 61850, однолинейная схема которой изображена на рисунке 30. Разработана адаптивная защита, подробно описаны настройки конфигурации, проведено тестирование и проверка ее применения в различных режимах работы.

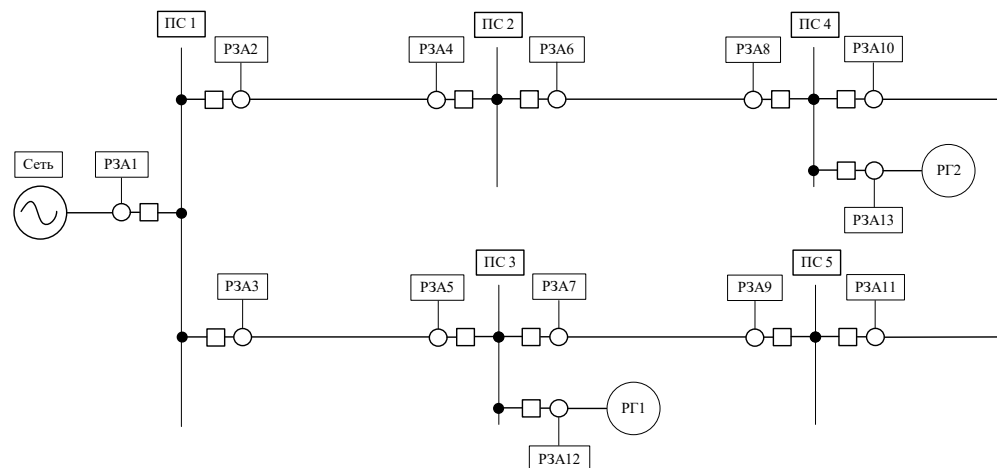


Рис. 30. Однолинейная схема распределительной сети с наличием источников РГ

Fig. 30. Single-line diagram of the distribution network with the presence of distributed generation sources

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

Используемый в работе алгоритм (рис. 31) представляет собой блок-схему, которая описывает процесс настройки РЗ с учетом источников распределенной генерации. Он выполняет последовательную проверку состояния различных элементов сети и включает или отключает функцию защиты в зависимости от состояния элементов и топологии сети.

Запускается процесс настройки защиты и определяются состояния основного выключателя и DER. Если DER и кольцевая сеть включены, применяется направленная МТЗ (ANSI 67), другие отключаются, в зависимости от состояния DER и его вклада в величину тока КЗ. Если пройдены все элементы сети, задаются новые уставки РЗ в нормальном и изолированном режимах, после чего настройки защиты завершаются.

Экспериментальные данные показывают, что при использовании GOOSE-сообщений время срабатывания РЗ составляет 2-4 миллисекунды, что соответствует основным требованиям к РЗ. Быстродействие позволяет почти мгновенно изолировать поврежденные участки РС, предотвращая развитие аварийной ситуации и минимизируя воздействие на других потребителей.

Статья [13] рассматривает влияние интеграции распределенной генерации (РГ) на координацию направленных токовых реле (DOCR) в распределительных сетях. Внедрение РГ на основе ВИЭ, улучшает качество напряжения и снижает потери мощности, однако также вызывает проблемы РЗ сети, особенно ее координации при КЗ. Главная цель исследования – анализ нарушений координации РЗ при разных уровнях интеграции РГ.

Для того чтобы избежать влияния РГ на РЗ, в работе [19] предлагается метод оптимизации мощности и места установки РГ, основанный на генетическом алгоритме.

Основной принцип заключается в итеративном улучшении решения. Генетический алгоритм ищет оптимальные параметры для РГ и настройки РЗ, от создания начальных решений до улучшения через селекцию, кроссовер и мутацию. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет найдено наилучшее решение, соответствующее оптимальной генерируемой мощности и безопасной работе самой сети. Таким образом, эксперимент

подтвердил, что учет РЗ является ключевым условием при интеграции РГ в сеть, а предложенный подход на базе генетического алгоритма позволяет находить сбалансированные решения, которые обеспечивают максимальную эффективность и безопасную работу сети.

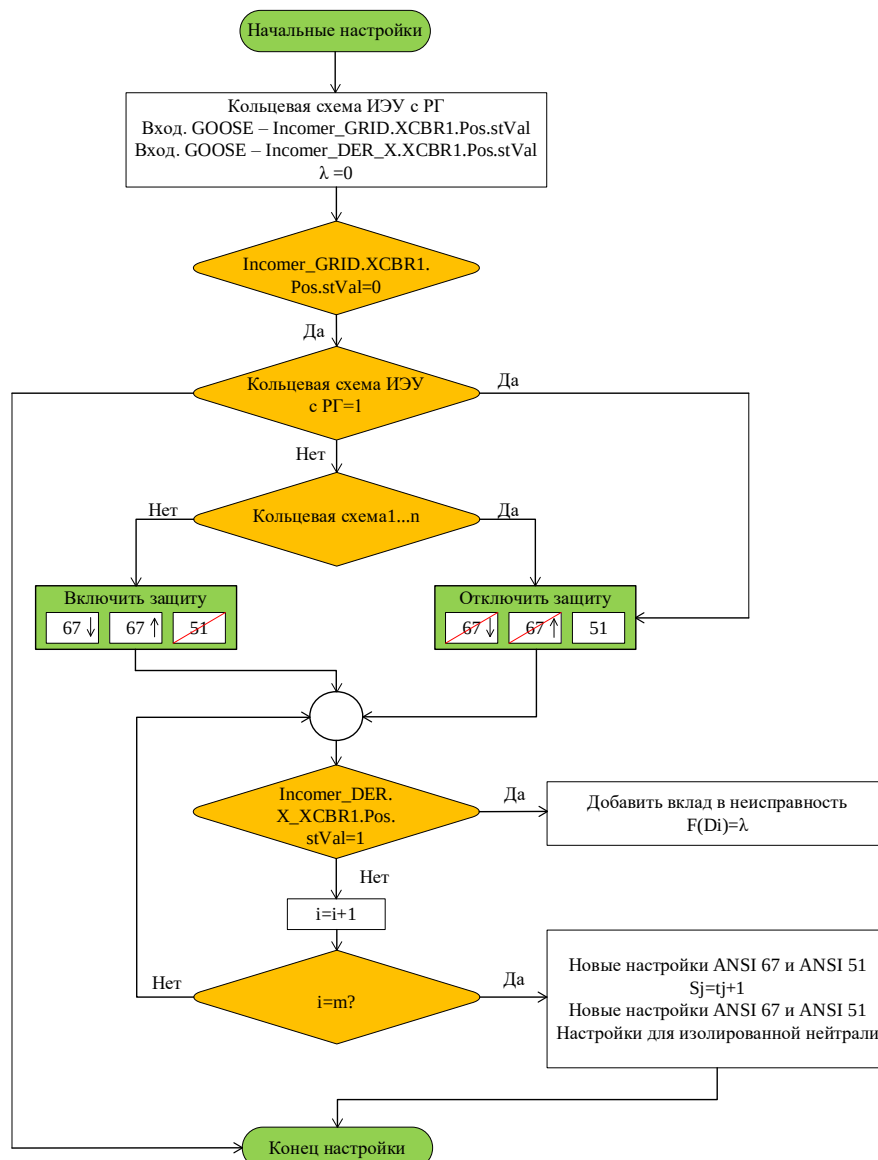


Рис. 31. Алгоритм создания адаптивной защиты в реальном времени [10] Fig. 31. Algorithm for creating real-time adaptive defense [10]

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

В статье [22] исследуется работа дистанционной защиты в условиях, когда в сети присутствуют несколько источников распределенной генерации (например, солнечные и ветряные). Для эксперимента было предложено и протестировано четыре различных метода определения точности работы дистанционной защиты. Все методы направлены на решение проблемы измерения сопротивления, измеряемого реле, из-за присутствия нескольких источников питания.

Первый метод основан на корректировке измеряемого сопротивления в зависимости от значения тока КЗ и токов, вносимых источниками РГ. Для определения полного сопротивления используется следующая формула:

$$Z_{DR} = Z_A + (1 + K_1)Z_B + (1 + K_2)Z_C$$

где Z_A , Z_B и Z_C – фактические сопротивления линии прямой последовательности; K – постоянная питания $K_1 = I_1 / I_S$.

Основные этапы для корректирования истинного значения Z_{DR} следующие:

1) Расчет сопротивления в месте КЗ; 2) Расчёт тока КЗ; 3) Расчет тока подпитки от источников РГ; 4) Коррекция полученного результата для повышения точности.

Этот метод требует выполнения предварительных расчетов и хранения данных, что может привести к увеличению вычислительных ресурсов и памяти.

Второй метод основан на построении двух кривых сопротивления от расстояния (ID-кривых). Одна кривая строится с учётом присутствия источников РГ, другая — без их учёта. После измерения реле сопротивления его сравнивают с ID кривой для определения реального значения сопротивления и расстояния до места короткого замыкания. Особенность метода заключается в необходимости проведения предварительных расчётов для формирования сигналов кривых, а также в использовании реле памяти для их хранения.

В третьем методе пристальное внимание уделено использованию локальных измерений тока и напряжения в месте установки РЗ, без необходимости выполнения офлайн-расчетов. Это делает метод менее совершенным и более традиционным, что требует меньше вычислительных ресурсов.

Ну и четвертый метод основан на использовании преобразования Стоквелла для анализа временных и частотных характеристик сигнала. Метод позволяет точно определить направление поворота, выбор фазы и величину сопротивления. Преимущество метода заключается в его высокой точности, но он требует значительных вычислительных ресурсов.

Все предложенные методы были оценены как по стоимости, точности результатов, так и по необходимым данным и расчетам и занесены в таблицу 6.

Таблица 6

Table 6

Сравнение предложенных методов

Comparison of the proposed methods

Предлагаемые способы	Необходимые данные и расчеты	Стоимость	Точность результатов
1 метод	Местные измерения Системные данные Офлайн-расчеты	Очень низкая	Очень высокая
2 метод	Местные измерения Системные данные Офлайн-расчеты	Очень низкая	Очень высокая
3 метод	Местные измерения Системные данные	Очень низкая	Высокая
4 метод	Местные измерения Системные данные Офлайн-расчеты	Низкая	Очень высокая

*Источник: [22] Source: [22].

Материалы и методы (Materials and methods)

Методы исследования основаны на положениях системного анализа, теоретической электротехники, теоретических основ релейной защиты. По данным открытой печати и обсуждений проводится анализ влияния источников распределенной генерации на работу устройств релейной защиты и поведение распределительной сети. При исследовании проблем функционирования устройств релейной защиты и влияния источников РГ на РС рассматриваются варианты РС с наличием в них источников РГ: по их количеству и установленной мощности, их оптимального расположения.

Основные результаты и обсуждение (Results and Discussions)

В рамках изложенного выше литературного обзора можно сделать вывод, что величина тока КЗ значительно зависит от типа источника, подключенного к РС — синхронных генераторов или инверторных источников РГ.

Инверторы имеют встроенные функции ограничения тока, что позволяют избежать значительных скачков тока во время КЗ. В случае аварии инверторы быстро снижают ток, так как не обладают ротором и инерцией, как синхронные генераторы, что ограничивает их способность поддерживать ток КЗ в течение длительного времени, тем самым уменьшая уровень тока подпитки КЗ. Поэтому они могут поддерживать ток КЗ только в течение короткого промежутка времени, снижая его до минимального уровня. Это делает инверторные источники менее опасными для сети с точки зрения большого тока КЗ. Схема замещения инвертора изображена на рисунке 32.

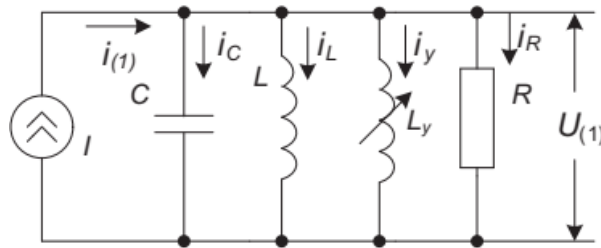


Рис. 32. Схема замещения трехфазного инвертора [33] Fig. 32. Substitution diagram of three-phase inverter [33]

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

Инверторы, в аварийном режиме, способны пропускать небольшую величину тока (1,2-1,5 от номинального значения), поскольку контролируются электронной схемой, которая имеет встроенную защиту по току и снижает выходной ток при КЗ (рис. 33) [31].

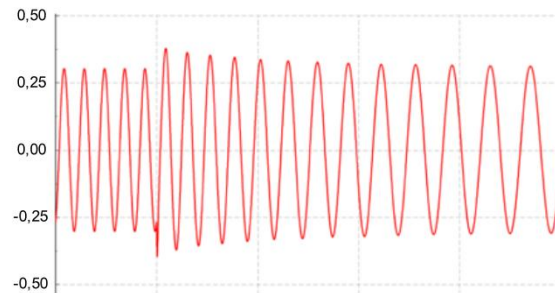


Рис. 33. Пример величины тока подпитки КЗ инверторным источником РГ [31] Fig. 33. Example of short-circuit make-up current value by inverter source of distributed generation [31]

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

Максимальный ток инвертора при подпитке точки КЗ может быть рассчитан по формуле:

$$I_{КЗ}^{(3)} \approx I_{ном} \cdot K_{перезгрузки}$$

где $I_{ном}$ — номинальный ток инвертора, А; $K_{перезгрузки}$ — коэффициент перегрузочной способности инвертора (обычно не более 1,2–1,5).

Допустим номинальный ток инвертора $I_{ном} = 1000$ А; коэффициент перегрузочной способности инвертора $K_{перезгрузки} = 1,5$. Тогда ток КЗ будет равен:

$$I_{КЗ}^{(3)} = 1000 \cdot 1,5 = 1500 \text{ А.}$$

Помимо низкой величины тока подпитки КЗ, инверторы имеют ограниченные возможности в генерации реактивной мощности, которая важна для поддержания уровня тока КЗ, что снижает вклад в подпитку КЗ и нагрузку на систему релейной защиты, величина ЭДС зависит от настройки выходного напряжения и управляющей электроники, которая устанавливает заданные параметры тока и напряжения. Уравнение для ЭДС инвертора можно представить в виде:

$$E = V_{dc} \cdot M \cdot \cos(\theta)$$

где V_{dc} — напряжение постоянного тока на входе инвертора, M — модуляционный коэффициент инвертора, который определяет амплитуду выходного напряжения, θ — угол фазового сдвига (может быть настроен для синхронизации с сетью).

В отличие от синхронных машин, у инверторов отсутствует зависимость ЭДС от скорости вращения ротора, так как механических вращающихся частей нет и ЭДС может изменяться в широких пределах в зависимости от входного напряжения и управления. Инверторы могут оперативно изменять ЭДС, чтобы снизить или вовсе прекратить подпитку КЗ.

Синхронные генераторы имеют другую динамику при коротком замыкании. ЭДС синхронных генераторов линейно зависит от магнитного потока и частоты. Зависимость ЭДС от величины напряжения синхронных генераторов можно выразить как:

$$E = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi$$

где f — частота вращения поля ротора (равна частоте сети), N — число витков в обмотке статора, Φ — магнитный поток, создаваемый ротором.

При изменении напряжения сети ЭДС меняется в меньшей степени, так как основной вклад в ее величину вносит магнитное поле ротора. В аварийном режиме (например, при коротком замыкании) синхронные генераторы могут поддерживать высокий уровень тока и ЭДС за счет инерции ротора. Они способны генерировать значительно больший ток по сравнению с инверторными источниками, что позволяет поддерживать ток КЗ на высоком уровне в течение длительного времени. Этот эффект полезен для традиционных релейных защит, так как он позволяет быстро и надежно обнаруживать КЗ. Они также могут генерировать значительные объемы реактивной мощности, что увеличивает устойчивость сети при аварийных ситуациях. Связано это с физическими характеристиками синхронных генераторов, которые могут развивать большие пусковые токи и обеспечивать длительное поддержание тока КЗ. Высокий ток КЗ, подпитываемый синхронными генераторами, может быть в 5-10 раз выше номинального тока (рис. 34), что приводит к большому ущербу в системе, если авария не будет быстро локализована, а также увеличивает риск каскадных отключений при неправильной работе защитных устройств.

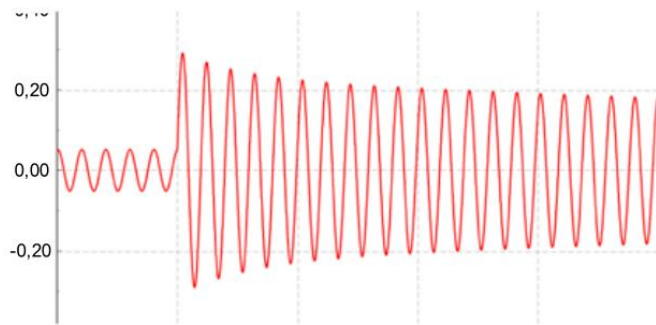


Рис. 34. Пример величины тока подпитки КЗ синхронным генератором [31] Fig. 34. Example of short-circuit make-up current of a synchronous generator [31]

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

Схема замещения включает (рис. 35) сверхпереходное сопротивление x_d'' (Ом) и сверхпереходное ЭДС E_d'' (кВ).

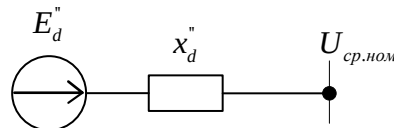


Рис. 35. Схема замещения синхронного генератора Fig. 35. Substitution diagram of synchronous generator

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

Основное уравнение для расчета ТКЗ:

$$I_{КЗ}^{(3)} = \frac{E_q''}{\sqrt{3} \cdot x_q''}$$

$$E_q'' = E_{q*}'' \cdot U_{ср.ном}$$

$$x_d'' = x_{d*}'' \cdot \frac{U_{ср.ном}^2}{S_{ном}}$$

где $U_{ср.ном}$ — среднее номинальное междуфазное напряжение, кВ; E_{q*}'' — сверхпереходное ЭДС синхронного генератора, о.е.; x_{d*}'' — сверхпереходное сопротивление синхронного генератора, о.е.; $S_{ном}$ — номинальная полная мощность синхронного генератора, МВА; $I_{КЗ}^{(3)}$ — ток трехфазного КЗ.

Допустим, сверхпереходное ЭДС синхронного генератора $E_{q*}'' = 1,08$ о.е., сверхпереходное сопротивление $x_{d*}'' = 0,125$ о.е., $S_{ном} = 100$ МВА, а $U_{ср.ном} = 10,5$ кВ. Тогда ток КЗ можно рассчитать:

$$E_q'' = 1,08 \cdot 10,5 = 11,34 \text{ кВ};$$

$$x_d'' = 0,125 \cdot \frac{10,5^2}{100} = 0,14 \text{ Ом};$$

$$I_{КЗ}^{(3)} = \frac{11,34}{\sqrt{3} \cdot 0,14} = 46,76 \text{ кА}.$$

Синхронные генераторы, в отличие от инверторных, обеспечивают более устойчивую подпитку КЗ, что облегчает работу релейной защиты, но увеличивает нагрузку на оборудование и создает риск значительных повреждений.

В заключении можно сказать, что ЭДС синхронных генераторов и инверторных источников распределенной генерации сильно различаются: у синхронных генераторов ЭДС зависит от физического вращения и магнитного потока, что делает их стабильными, но менее гибкими в настройках; у инверторов ЭДС полностью управляется электроникой, что обеспечивает высокую гибкость, но ограничивает уровень тока и длительность подпитки в аварийных режимах.

Таким образом, инверторные источники распределенной генерации оказывают ограниченное влияние на ток короткого замыкания, тем самым снижая чувствительность РЗ. Синхронные генераторы, напротив, создают высокий уровень тока КЗ, что увеличивает нагрузку на систему и риск повреждений. Выбор подхода к защите сети с учетом этих особенностей играет важную роль в обеспечении безопасности и надежности работы электросетей с распределенной генерацией. Все преимущества и недостатки каждого из источников, а также их влияние на РС приведены в таблице 7.

Таблица 7
Table 7

Различия между ЭДС синхронных машин и инверторных источников РГ

Differences between the EMF of synchronous machines and inverter sources of distributed generation

Характеристика	Синхронные генераторы	Инверторные источники
Уровень тока КЗ	Высокий	Низкий, ограниченный
Время подержания тока КЗ	Долгое, поддерживается инерцией	Короткое, быстро снижается
Реактивная мощность	Высокая, поддерживает уровень тока КЗ	Ограниченная
Реагирование на ток КЗ	Постоянная подпитка точки КЗ	Быстрое ограничение и отключение инвертора
Ущерб оборудования в РС	Высокий, из-за высокого тока КЗ	Низкий
ЭДС	ЭДС возникает за счет вращения ротора с постоянным магнитным полем, частота которого синхронизирована с сетью	ЭДС возникает за счет инвертора, преобразующего постоянный ток в переменный, частота настраивается
Зависимость ЭДС от частоты	Прямая зависимость от частоты сети (синхронная частота)	Зависимость от управляющей электроники, независимость от частоты сети
Зависимость ЭДС от напряжения	Прямая зависимость от магнитного потока и частоты, изменение напряжения сети мало влияет на величину ЭДС	ЭДС зависит от входного напряжения постоянного тока и модуляционного коэффициента инвертора
Регулировка ЭДС	Ограниченная регулировка, зависит от механических и магнитных параметров	Широкие возможности регулировки с помощью электроники
Поведение при КЗ	Высокий уровень тока при коротком замыкании из-за инерции ротора	Ограничение тока при коротком замыкании, благодаря встроенным защита и ограничивающей электронике
Вклад в ток КЗ	Существенный, может поддерживать высокий ток за счет инерции	Небольшой вклад в ток КЗ, быстрый сброс мощности при аварийных режимах

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

Эта таблица наглядно демонстрирует различия между синхронными генераторами и инверторными источниками распределенной генерации, что важно учитывать при проектировании систем релейной защиты для электросетей с распределенной генерацией.

В целом, каждый из рассматриваемых методов и алгоритмов построения адаптивной РЗ имеет свои сильные и слабые стороны, подходящие для определенных условий работы сети. Методы и алгоритмы, основанные на цифровых протоколах (IEC 61850), обеспечивают высокую скорость и точность, но требуют развитой инфраструктуры цифровых сетей (каналов связи). Использование направленных защит и статистических методов, в свою очередь, могут быть менее затратными, но предъявляют высокие требования к вычислительным ресурсам и точности настроек. Выбор того или иного метода/алгоритма зависит от специфики сети, мощности распределенной генерации и доступного бюджета.

На основе анализа всех статей, рассмотренных в этой работе, приводится сравнительная характеристика методов и алгоритмов, применяемых в рассматриваемой литературе (табл. 8), где описываются основные преимущества, недостатки, точность измерений и стоимость реализации.

Таблица 8

Table 8

Сравнительный анализ методов и алгоритмов РЗ РС с РГ

Comparative analysis of methods and algorithms of relay protection of a distributed generation distribution network

1. Адаптивная защита	
Описание	Этот метод использует множество параметров сети (ток, напряжение, мощность) для адаптации уставок защиты в режиме реального времени. Подходит для РС с высоким содержанием РГ.
Преимущества	Высокая чувствительность и селективность в обнаружении аварийных режимов за счет анализа нескольких параметров.
Недостатки	Высокие требования к вычислительным мощностям и цифровым каналам связи.
Точность измерения	Очень высокая, поскольку ведется анализ нескольких параметров сети, позволяя точно определять ее состояние.
Стоимость	Высокая, поскольку требуется мощное оборудование и развитая инфраструктура цифровых сетей.
2. Направленная защита	
Описание	Этот метод основывается на направлении тока для определения неисправностей в сети, особенно эффективен при междуфазных КЗ и ОЗЗ.
Преимущества	Высокая точность и чувствительность для междуфазных КЗ и ОЗЗ. Быстрое срабатывание благодаря учету направления тока, что снижает вероятность неселективного отключения.
Недостатки	Метод менее эффективен на коротких линиях с мощными источниками РГ, где ток подпитки КЗ со стороны основной сети может иметь меньшую величину для срабатывания защиты из-за наличия источника РГ большой мощности.
Точность измерения	Высокая, при оптимальном размещении источников РГ и их мощности.
Стоимость	Средняя, поскольку метод не требует сложной цифровой инфраструктуры, но требует точных устройств для измерения направления тока.
3. Адаптивная защита с использованием GOOSE-сообщений (IEC 61850)	
Описание	Этот метод основан на применении стандарта IEC 61850, посредством GOOSE-сообщений, которые обеспечивают быстрый обмен данными между устройствами РЗ.
Преимущества	Высокая скорость передачи данных и надежность. Позволяет использовать устройства РЗ в сетях с частыми изменениями топологии.
Недостатки	Высокие требования к системе передачи данных и совместимости с протоколом IEC 61850. Зависимость от цифровой инфраструктуры для передачи данных может стать проблемой при недостаточно надежных каналах связи.
Точность измерения	Высокая, так как метод обеспечивает мгновенный обмен данными, что позволяет своевременно реагировать на аварийные ситуации.
Стоимость	Высокая, так как требуется дорогостоящее оборудование и поддержка стандарта IEC 61850 для совместимости оборудования в сети.
4. Координация защиты по току	
Описание	Этот метод обеспечивает координацию устройств РЗ на основе направления тока и его амплитуды. Это позволяет улучшить точность срабатывания защитных устройств и предотвратить неселективные отключения.
Преимущества	Высокая надежность за счет координации устройств РЗ и возможности управления, основываясь на направлении и амплитуде тока, что минимизирует неселективные отключения.

Недостатки	Требует сложной настройки и регулярного поддержания координации между устройствами, что повышает эксплуатационные затрат
Точность измерения	Средняя, зависит от точности координации между устройствами. При правильной настройке обеспечивает высокий уровень надежности
Стоимость	Средняя, так как требуется оборудование для мониторинга и координации, но оно доступнее, чем в системах на базе цифровых протоколов
5. Статистический метод на основе Байесовского подхода	
Описание	Этот метод использует Байесовский подход для анализа вероятностей аварийных состояний и настройки защиты. Применяется в сетях с постоянно изменяющимися параметрами, что актуально для сетей с РГ.
Преимущества	Снижает вероятность ложных срабатываний благодаря вероятностному анализу, обеспечивает адаптацию к изменениям в сети и повышает селективность защиты.
Недостатки	Высокие требования к вычислительным ресурсам и сложности в настройке алгоритмов обработки данных. Метод требует мощных ресурсов для анализа больших объемов информации.
Точность измерения	Очень высокая при наличии достаточного объема данных для анализа.
Стоимость	Высокая, так как требуется развитая инфраструктура цифровой сети и квалифицированный обслуживающий персонал.
6. Адаптивная защита на основе учета мощности РГ	
Описание	Данный метод направлен на адаптацию релейной защиты к изменяющимся уровням мощности источников РГ. Он позволяет учитывать непостоянство источников РГ для повышения точности.
Преимущества	Неплохая точность за счет адаптации уставок в зависимости от уровня генерации, что позволяет лучше учитывать влияние РГ.
Недостатки	Высокие требования к системе мониторинга, так как изменения в генерации требуют мгновенной адаптации параметров защиты.
Точность измерения	Средняя, так как точность зависит от качества системы мониторинга
Стоимость	Средняя, требуется оборудование для мониторинга РГ
7. Адаптивная защита на основе статистического анализа	
Описание	Данный метод заключается в статистическом анализе параметров сети для адаптации параметров РЗ, что помогает повысить точность работы в сетях с РГ
Преимущества	Высокая чувствительность и возможность учета параметров РГ, что делает систему гибкой и точной
Недостатки	Требует сложной настройки и частой калибровки, что увеличивает потребность в мощном вычислительном оборудовании
Точность измерения	Высокая, при условии использования достаточного количества параметров
Стоимость	Высокая, так как требуется высокоточное оборудование для анализа данных и цифровой инфраструктуры

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

Эти подходы повышают чувствительность и селективность релейной защиты в условиях сетей с распределенной генерацией, где традиционные методы часто оказываются неэффективными из-за изменений напряжения, величины тока и их направления. Выбор конкретного метода защиты зависит от структуры сети и технологических возможностей, включая развитость цифровых каналов связи и требований к обработке данных.

Рассматриваемые решения показывают, что современные методы релейной защиты способны эффективно адаптироваться к условиям распределенной генерации, но требуют значительных вложений в оборудование, особенно при работе с цифровыми протоколами передачи данных, такими как IEC 61850. Точность измерений которых зависит от сложности алгоритмов, что, в свою очередь, влияет на стоимость и возможности этих решений в распределительных сетях.

Использование стандарта IEC 61850, статистических и вероятностных методов позволяет значительно повысить гибкость и надежность защиты. Эти технологии позволяют обеспечить цифровую интеграцию устройств релейной защиты и обеспечить создание интеллектуальной энергосистемы, готовой к работе с высокой долей распределенной генерации в сети. Дальнейшее развитие интеллектуальных систем защиты станет важнейшим залогом безопасной и стабильной работы энергосистем будущего, в которых возобновляемая энергетика играет все более значимую роль.

Заключение (Conclusions)

Внедрение источников распределенной генерации (РГ) на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в распределительных сетях меняет их характер и ставит новые задачи перед релейной защитой. Инверторные источники РГ, такие как солнечные и

ветряные электрические станции имеют особенности, которые оказывают непосредственное влияние на надежность и безопасность работы сетей.

В этой статье был выполнен обзор литературы, касающейся интеграции распределенной генерации в электрические сети. Рассмотрены их преимущества и актуальные проблемы. В результате проведенных исследований установлено, что интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в распределительные сети 6-10 кВ оказывает значительное влияние на токи короткого замыкания и работу релейной защиты. Анализ показал, что традиционные методы настройки защит не обеспечивают достаточной селективности и чувствительности в условиях изменяющейся генерации от ВИЭ, особенно инверторных источников, что приводит к необходимости в перестроении РЗ в целом.

Статья обуславливает необходимость пересмотра подхода к обеспечению распределительных сетей с РГ. Интеграция ВИЭ требует разработки новых методов релейной защиты, которые будут учитывать особенности инверторных источников генерации. Важно разработать адаптивные и интеллектуальные системы защиты, которые смогут эффективно работать в условиях изменяющихся параметров сети, двустороннего потока мощности и ограничения токов короткого замыкания. Внедрение цифровых протоколов связи, таких как IEC 61850, и применение статистических методов могут значительно повысить надежность и устойчивость современных распределительных сетей с высокими долями РГ.

Перспективы дальнейшего развития заключаются: в разработке математических моделей для более точного расчета токов КЗ с учетом влияния различных типов ВИЭ; оптимизации алгоритмов защиты с использованием технологий искусственного интеллекта и машинного обучения; экспериментальном моделировании адаптивных методов защиты в реальных распределительных сетях; разработке рекомендаций по изменению нормативных требований для защиты сетей с высокой долей ВИЭ.

На основе проведенного исследования сформулированы практические рекомендации, направленные на повышение надежности работы релейной защиты распределительных сетей 6-10 кВ в условиях интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ). К ним можно отнести:

1. Внедрение адаптивных алгоритмов релейной защиты;
2. Применение устройств ограничения тока короткого замыкания;
3. Развитие интеллектуальных систем мониторинга и управления;
4. Оптимизация параметров настройки релейной защиты в РС с ВИЭ;
5. Корректировка нормативных документов и стандартов по защите РС с ВИЭ;
6. Экспериментальная проверка предложенных решений в реальных условиях.

Литература

1. Cui S. Adaptive current protection technology for distribution network with distributed power sources based on local information / S. Cui, P. Zeng, Z. Wang, Y. Zuo // 2021 Mobile information systems. – Hindawi, 2021. – Vol. 2021 – P. 1-8. DOI:10.1155/2021/5137749.
2. Воропай Н.И. Распределенная генерация в электроэнергетических системах / Н.И. Воропай // 2005 Международная научно- практическая конференция «Малая энергетика-2005». [Электронный ресурс, режим доступа]: <http://www.combienergy.ru/stat/983-Raspredeleonnaya-generaciya-velektroenergeticheskikh-sistemah> (дата обращения: 15.08.2024).
3. Трачук А.В. Технологии распределенной генерации: Эмпирические оценки факторов применения / А.В. Трачук, Н.В. Линдер // 2018 Журнал стратегические решения риск-менеджмент. - №1. – С. 32-48. – DOI: 10.17747/2078-8886-2018-1-32-48.
4. Гуревич Ю.Е. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: монография / Ю.Е. Гуревич, П.В. Илюшин. – Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018. – 280 с.
5. Liu B. Influence of distributed generation on fault characteristics and relay protection of rural distribution network / B. Liu, W. Liang, Y. Wang, Z. Zhao, Q. Tian, X. Li // 2023 Journal of physics: conference series. – ICEEPS, 2023 – DOI:10.1088/1742-6596/2728/1/012032.
6. Namangolwa L. Impacts of Solar Photovoltaic on the Protection System of Distribution Networks: Master's thesis in Electric Power Engineering / L. Namangolwa // Department of Energy and Environment: Division of Electric Power Engineering. – Chalmers university of technology, 2016. – Goteborg, Sweden.
7. Надергулов М.М. Проблемы внедрения распределенной генерации в распределительную сеть 6-10 кВ / М.М. Надергулов, Р.Г. Исаков // Материалы V Всероссийской научно-практической (с международным участием) конференции, посвященной празднованию 55-летия КГЭУ «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники» (2023, Казань, Россия). – Издательство Казанского государственного университета, 2023. – С. 294.

8. Симанчев Д.А. Интеллектуальная система управления отбором мощности ветроустановки в составе ветроэлектростанции: направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»: магистерская диссертация / Д.А. Симанчев; [Место защиты: Тольяттинский государственный университет]. – Тольятти, 2020. – 88 с. / Д.А. Симанчев; [науч. рук. С.В. Шаповалов]. – Тольятти: 2020. – 88 с
9. Cleberton R. Optimal coordination of protection devices in distribution networks with distributed energy resources and microgrids / R. Cleberton, J.B. Leite // 2022 IEEE Access. – IEEE, 2022. – Vol. 10 – P. 99584-99594. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3203713.
10. Silos A. Using IEC 61850 GOOSE service for adaptive ANSI 67/67N protection in ring main systems with distributed energy resources / A. Silos, A. Señas, R. Martín de Rozuelo, A. Zaballos // 2017 Energies. Electrical engineering. – Vol. 10 – No. 11 – P. 1685 – DOI:10.3390/en10111685.
11. Pavani P. Optimal placement techniques for distributed generation / P. Pavani, Dr.S.N. Singh // 2015 Electrical India. – February 2015. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://www.electricalindia.in/optimal-placement-techniques-for-distributed-generation/> (Дата обращения: 12.02.24).
12. Sarabia A.F. Impact of distributed generation on distribution system: the faculty of engineering, science and medicine: Dissertation fulfilment for the degree of master graduate / A.F. Sarabia; [Aalborg university, Denmark]. – Aalborg, 2011.
13. Ayvaz A. An investigation of the impact of distributed generation penetration on directional overcurrent relay coordination in a distribution network / A. Ayvaz // 2023 Gazi university journal of science: engineering and innovation. – GU J Sci, 2023 – Vol. 10 – No. 3 – P. 301-309 – DOI:10.54287/gujisa.1332535.
14. Логинов Н.А. Исследование динамической устойчивости источников генерации, подключённых через инверторные преобразователи / Н.А. Логинов // Научные междисциплинарные исследования: сборник статей XIV Международной научно-практической конференции. / XIV Международная научно-практическая конференция (2021, Москва, Россия). – Издательство: «КДУ», «Добросвет», 2021. – С. 86-92.
15. Международный Совет по большим электрическим системам высокого напряжения – CIGRE. Моделирование генерации на базе инверторных преобразователей для энергетической системы // Международная конференция по распределению электроэнергии – CIRED. – май 2018. – 293 С. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://cired.net/uploads/default/files/727-web.pdf> (дата обращения: 08.05.2024)
16. Kanani B.D. Distributed generation and power quality / B.D. Kanani / Electrical engineering department. – EE Department. – Power quality and management (2180911).
17. Hosseini S. H. Review of distributed generation technologies / S.H. Hosseini, M. Ghasemi // 2015 Renewable and Sustainable Energy Reviews. – RSER, 2015 – Vol. 55 – P. 941-948 – DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.050
18. Dysko A. The impact of renewable energy sources and distributed generation on substation protection and automation / A. Dysko, J.A. Gonzalez, G. Lloyd // 21, rue d'Artois, F-75008 Paris. – CIGRE, 2010.
19. Li Y. Research on grid-connected distributed generation considering relay protection / Y. Li, X. Sun, H. Cai, M. Liu, Y. Yang // 2022 Journal of physics: Conference series. – ICESEP, 2022 – DOI:10.1088/1742-6596/2310/1/012031.
20. Majhi A.A.K. Coordination of overcurrent and distance relays in power system networks with distributed generations / A.A.K. Majhi, R. Ray, M. Biswal // 2024 Research square journal. – RS, 2024 – DOI:10.21203/rs.3.rs-3897748/v1.
21. Aziz T. Impact of widespread penetrations of renewable generation on distribution system stability / T. Aziz, S. Dahal, N. Mithulanathan, T.K. Saha // 2010 6th International conference on electrical and computer engineering. – ICECE, 2010 – P. 338-341. – DOI:10.1109/ICELCE.2010.5700697.
22. Устинов Д.А. Исследование алгоритмов работы дистанционной защиты в системах распределенной генерации / Д.А. Устинов, А.Р. Ансар / 2023 Доклады академии наук высшей школы Российской Федерации. – АН ВШ РФ, 2023. – № 2 (59). – С. 41–55 – DOI:10.17212/1727-2769-2023-2-41-55.
23. Gianto R. Distributed generation in electric power systems: An overview and important issues / R. Gianto, M.I. Arsyad, Purwoharjono, F. Imansyah, K.H. Khwee // 2022 WSEAS transactions on power systems. – WSEAS, 2022 – Vol. 18 – P. 172-178 – DOI:10.37394/232016.2023.18.18
24. Olanrewaju O. Decentralized and distributed power generation / O. Olanrewaju, M.J. Barasa Kabeyi // 2023 Proceedings of the 5 African international conference on industrial engineering and operations management. – IEOM Society international, 2023 – DOI:10.46254/AP04.20230268.
25. Котин Д.А. Использование однофазного синхронного многообмоточного генератора с постоянными магнитами для электроснабжения автономного потребителя / Д.А. Котин, И.А. Иванов //

2022 Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2022. – Т. 24. – №1. – С. 29-38. DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-1-29-38.

26. Сорокина Д.С. Трудности внедрения источников распределенной генерации и пути их решения с использованием адаптивной релейной защиты и автоматики / Д.С. Сорокина, И.Н. Гладков // 2022 Материалы XIV Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». – URL: <https://scienceforum.ru/2022/article/2018029576> (дата обращения 02.06.2024).

27. Alvarez de Sotomayor A. IEC 61850-based adaptive protection system for the mv distribution smart grid / A. Alvarez de Sotomayor, D. Della Giustina, G. Massa, A. Dedè, F. Ramos, A. Barbato // 2017 Sustainable energy, grids and networks journal. – SEGAN, 2017 – DOI:10.1016/j.segan.2017.09.003.

28. Котов А.А. Применение генератора двойного питания для ветроэнергетических установок малой, средней и большой мощности / А.А. Котов, Н.И. Неустров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – Южно-Уральский государственный университет, 2017. – Т. 17 – № 4. – С. 80–89 – DOI: 10.14529/power170409.

29. Chi Y. Multi-stage coordinated dynamic VAR source placement for voltage stability enhancement of wind-energy power system / Y. Chi, Y. Xu // 2020 IET Generation, Transmission & Distribution. – Vol. 14 – P. 931-1167 – DOI: 10.1049/iet-gtd.2019.0126www.ietdl.org.

30. Patel H. Analyse the impact of distributed generation units on distribution system performances / H. Patel, B.K. Saw, A.K. Bohre, O. Yadav // 2023 IEEE International conference on power electronics, smart grid and renewable energy. – PESGRE, 2023 – DOI:10.109/PESGRE.58662.2023.10404345.

31. Quispe J.C. Transmission line protection challenges influenced by inverter-based resources: a review / J.C. Quispe, E. Orduna // 2022 Protection and Control of Modern Power Systems. – 2022 – DOI:10.1186/s41601-022-00249-8.

32. Hida A. Impact of the distributed generation on the power quality indicators of the distribution network, A case study in Korça / A. Hida, R. Bualoti, M. Celo, M. Hysenbegasi // 2023 16th International scientific conference of energy and climate change. – ISCECC, 2023.

33. Петросян Н. Основные принципы создания преобразователей постоянного напряжения в стабилизированное переменное напряжение синусоидальной формы сетевой частоты / Н. Петросян, Д. Киракосян // 2013 журнал «Силовая электроника». – Т.6 – №45 – С.79-84.1

34. Иванова В.Р. Структурный и параметрический синтез алгоритмов противоаварийного управления для реализации адаптивной частотной делительной автоматики электротехнических систем. / В.Р. Иванова, И.Ю. Иванов, В.В. Новокрещенов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. – Т. 21 – № 4 – С. 66-76 – DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-4-66-76.

35. Takele H.M. Increment of fault current due to integration of distributed generation and its impact on distribution network protection / H.M. Takele // 2021 Research square journal. – RS, 2021 – DOI:10.21203/rs.3.rs-968650/v1.

36. Maharmi B. Integration of photovoltaic distributed generation in grid distribution network: A literature review / B. Maharmi, Syafii, A.A. Zakri // 2023 Andalasian international journal. – AIJASET, 2023 – Vol. 3 – No. 03 – P. 206-220 – DOI:10.25077/aijaset.v3i3.114.

37. Majeed A.A. A review of protection schemes for electrical distribution networks with green distributed generation / A.A. Majeed, A.S. Altaie, M. Abderrahim, A. Alkhazraji // 2023 Energies. Electrical engineering. – Vol. 16 – No. 22 – P. 7587 – DOI:10.3390/en16227587.

38. Adebayo A.D. An overview of distributed generation on power systems / A.D. Adebayo, J.U. Chinedu // 2022 International journal of frontline research in engineering and technology. – IJFRET, 2022 – Vol. 1 – No. 1 – P. 27-33 – DOI:10.56355/ijfret.2022.1.1.0001.

39. Lestari S.D. Integration of artificial intelligence for enhanced coordination of docr protection in distributed generation systems / S.D. Lestari, Samsurizal, A. Makkulai // 2024 Journal Teknik Elektro. – ELKHA, 2024 – Vol. 16 – No. 1 – P. 43 – DOI:10.26418/elkha.v16i1.72876.

40. Anaza S.O. Potential of renewable energy sources for distributed generations: An overview / S.O. Anaza, Y.S. Haruna, A.L. Amoo, A.A. Sadiq, Y.A. Yisah // 2023 International journal of scientific advances. – IJSCIA, 2023 – Vol. 4 – No. 1 – P. 21 – DOI:10.51542/ijscia.v4i1.21.

41. Zayzandehrodi H. Effect of renewable distributed generators on the fault current level of the power distribution systems / H. Zayandehrodi, A. Mohmed, H. Shareef, M. Farhoodnea, M. Mohamadjafari // 2013 Advanced materials research. – AMR, 2013 – DOI:10.4028/AMR.622.623.1882.

42. Omosigno E.O. Distributed generation technology; Advances and development trend / E.O. Omosigno, L.E. Okotie, J. Okoekhian // 2021 International journal of: science research and technology. – TIJSRAT, 2021 – Vol. 6 – No. 9 – DOI:10.13140/RG/2/2/21613/05602.

43. Debadatta A.G. Protection algorithms of microgrids with inverter interfaced distributed generation units – A review / A.G. Debadatta // 2021 Electric power systems research. – EPSR, 2021 – Vol. 192 – No. 11 – DOI:10.1016/j.epr.2020.106986.

44. Vijetha K. Adaptive relaying of radial distribution system with distributed generation / K. Vijetha, K.P. Sharath, M. Matcha // 2013 International Journal of Electrical and Computer Engineering. – IJECE, 2013. – Vol. 3 – № 3 – P. 407-414. DOI:10.11591/ijece.v3i3.2578.
45. Cherevatskiy S. Grid forming energy storage system addresses challenges of grids with high penetration of renewables (a case study) / S. Cherevatskiy, S. Sproul, S. Zabihi, R. Korte, H. Klingenberg, B. Buchholz, A. Oudalov // 2020 CIGRE session 48. – C2 – C6 – 322.
46. Memon A. A. Microgrid Protection with Conventional and Adaptive Protection Schemes / A. A. Memon, H. Laaksonen, K. Kauhaniemi // Microgrids, Power Systems, Springer Nature Switzerland AG, 2021 – DOI:10.1007/978-3-030-59750-4_19.
47. Farkhani J.S. The power system and microgrid protection — A review / J.S. Farkhani, M. Zareein, A. Najafi, R. Melicio, E.M.G. Rodrigues // 2020 Applied Sciences. - Appl. Sci., 2020. – Vol. 10 – № 8271 – P. 1-30. DOI:10.3390/app10228271.
48. Cisneros-Saldana J.I.D. On Protection Schemes for AC Microgrids: Challenges and Opportunities / J.I.D. Cisneros-Saldana, S. Samal, M.M. Begovic, S.R. Samantaray // 2024 IEEE Transactions on Industry Applications. – TIA, 2024. – PP(99):1-12. DOI:10.1109/TIA.2024.3353721
49. Khan J.A. Robust Unified Multi Diverse Protection Schemes for Low Voltage Microgrid / J.A. Khan, T. Mahmood // 2023 Journal of Electrical Engineering and Technology. – Vol. 19 - №2 – P.1079-1096. DOI:10.1007/s42835-023-01620-x
50. Chowdhury R. Line Current Differential Protection in Systems With Inverter-Based Resources—Challenges and Solutions / R. Chowdhury, R. McDaniel, N. Fischer // 2023 Conference: 76th Annual Conference for Protective Relay Engineers. DOI:10.2139/ssrn.4058823

Авторы публикации

Надергулов Марат Муслимович – аспирант кафедры «Электрооборудования» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия. nadergulov97@mail.ru

Исаков Руслан Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудования» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия. ruslanisakov@yandex.ru

References

1. Cui S. Adaptive current protection technology for distribution network with distributed power sources based on local information / S. Cui, P. Zeng, Z. Wang, Y. Zuo // 2021 Mobile information systems. – Hindawi, 2021. – Vol. 2021 – P. 1-8. DOI:10.1155/2021/5137749.
2. Voropai N.I. Raspredeennaya generatsiya v elektroenergeticheskikh sistemakh / N.I. Voropai // 2005 Mezhdunarodnaya nauchno- prakticheskaya konferentsiya «Malaya energetika-2005». [Elektronnyi resurs, rezhim dostupa]: <http://www.combienergy.ru/stat/983-Raspredeennaya-generatsiya-velektroenergeticheskikh-sistemah> (data obrashcheniya: 15.08.2024).
3. Trachuk A.V. Tekhnologii raspredelennoi generatsii: Empiricheskie otsenki faktorov primeneniya / A.V. Trachuk, N.V. Linder // 2018 Zhurnal strategicheskikh resheniya risk-menedzhment. - №1. – S. 32-48. – DOI: 10.17747/2078-8886-2018-1-32-48.
4. Gurevich Yu.E. Osobennosti raschetov rezhimov v energosistemakh s raspredelennoi generatsiei: monografiya / Yu.E. Gurevich, P.V. Ilyushin. – N. Novgorod: NIU RANKhiGS, 2018. – 280 s.
5. Liu B. Influence of distributed generation on fault characteristics and relay protection of rural distribution network / B. Liu, W. Liang, Y. Wang, Z. Zhao, Q. Tian, X. Li // 2023 Journal of physics: conference series. – ICEEPS, 2023 – DOI:10.1088/1742-6596/2728/1/012032.
6. Namangolwa L. Impacts of Solar Photovoltaic on the Protection System of Distribution Networks: Master's thesis in Electric Power Engineering / L. Namangolwa // Department of Energy and Environment: Division of Electric Power Engineering. – Chalmers university of technology, 2016. – Goteborg, Sweden.
7. Nadergulov M.M. Problemy vnedreniya raspredelennoi generatsii v raspredelitel'nyy set' 6-10 kV / M.M. Nadergulov, R.G. Isakov // Materialy V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi (s mezhdunarodnym uchastiem) konferentsii, posvyashchennoi prazdnovaniyu 55-letiya KGEU «Problemy i perspektivy razvitiya elektroenergetiki i elektrotekhniki» (2023, Kazan', Rossiya). – Izdatel'stvo Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2023. – S. 294.
8. Simanchev D.A. Intellekturnaya sistema upravleniya otborom moshchnosti vetroustanovki v sostave vetroelektrostantsii: napravlenie podgotovki 13.04.02 «Elektroenergetika i elektrotekhnika»: masterskaya dissertatsiya / D.A. Simanchev; [Mesto zashchity: Tol'yatinskii gosudarstvennyi universitet]. – Tol'yatti, 2020. – 88 s. / D.A. Simanchev; [nauch. ruk. S.V. Shapovalov]. – Tol'yatti: 2020. – 88 s

9. Cleberton R. Optimal coordination of protection devices in distribution networks with distributed energy resources and microgrids / R. Cleberton, J.B. Leite // 2022 IEEE Access. – IEEE, 2022. – Vol. 10 – P. 99584-99594. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3203713.
10. Silos A. Using IEC 61850 GOOSE service for adaptive ANSI 67/67N protection in ring main systems with distributed energy resources / A. Silos, A. Señas, R. Martín de Rozuelo, A. Zaballos // 2017 Energies. Electrical engineering. – Vol. 10 – No. 11 – P. 1685 – DOI:10.3390/en10111685.
11. Pavani P. Optimal placement techniques for distributed generation / P. Pavani, Dr.S.N. Singh // 2015 Electrical India. – February 2015. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://www.electricalindia.in/optimal-placement-techniques-for-distributed-generation/> (Дата обращения: 12.02.24).
12. Sarabia A.F. Impact of distributed generation on distribution system: the faculty of engineering, science and medicine: Dissertation fulfilment for the degree of master graduate / A.F. Sarabia; [Aalborg university, Denmark]. – Aalborg, 2011.
13. Ayvaz A. An investigation of the impact of distributed generation penetration on directional overcurrent relay coordination in a distribution network / A. Ayvaz // 2023 Gazi university journal of science: engineering and innovation. – GU J Sci, 2023 – Vol. 10 – No. 3 – P. 301-309 – DOI:10.54287/gujisa.1332535.
14. Loginov N.A. Issledovanie dinamicheskoi ustoichivosti istochnikov generatsii, podklyuchennykh cherez invertornye preobrazovateli / N.A. Loginov // Nauchnye mezhdistitsiplinarnye issledovaniya: sbornik statei XIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. / XIV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya (2021, Moskva, Rossiya). – Izdatel'stvo: «KDU», «Dobrosvet», 2021. – S. 86-92.
15. Mezhdunarodnyi Sovet po bol'shim elektricheskim sistemam vysokogo napryazheniya – CIGRE. Modelirovanie generatsii na baze invertornykh preobrazovatelei dlya energeticheskoi sistemy // Mezhdunarodnaya konferentsiya po raspredeleniyu elektroenergii – CIRED. – mai 2018. – 293 S. [Elektronnyi resurs]: Rezhim dostupa: <http://cired.net/uploads/default/files/727-web.pdf> (data obrashcheniya: 08.05.2024)
16. Kanani B.D. Distributed generation and power quality / B.D. Kanani / Electrical engineering department. – EE Department. – Power quality and management (2180911).
17. Hosseini S. H. Review of distributed generation technologies / S.H. Hosseini, M. Ghasemi // 2015 Renewable and Sustainable Energy Reviews. – RSER, 2015 – Vol. 55 – P. 941-948 – DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.050
18. Dysko A. The impact of renewable energy sources and distributed generation on substation protection and automation / A. Dysko, J.A. Gonzalez, G. Lloyd // 21, rue d'Artois, F-75008 Paris. – CIGRE, 2010.
19. Li Y. Research on grid-connected distributed generation considering relay protection / Y. Li, X. Sun, H. Cai, M. Liu, Y. Yang // 2022 Journal of physics: Conference series. – ICESEP, 2022 – DOI:10.1088/1742-6596/2310/1/012031.
20. Majhi A.A.K. Coordination of overcurrent and distance relays in power system networks with distributed generations / A.A.K. Majhi, R. Ray, M. Biswal // 2024 Research square journal. – RS, 2024 – DOI:10.21203/rs.3.rs-3897748/v1.
21. Aziz T. Impact of widespread penetrations of renewable generation on distribution system stability / T. Aziz, S. Dahal, N. Mithulanathan, T.K. Saha // 2010 6th International conference on electrical and computer engineering. – ICECE, 2010 – P. 338-341. – DOI:10.1109/ICELCE.2010.5700697.
22. Ustinov D.A. Issledovanie algoritmov raboty distantsionnoi zashchity v sistemakh raspredelennoi generatsii / D.A. Ustinov, A.R. Aisar // 2023 Doklady akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii. – AN VSh RF, 2023. – № 2 (59). – C. 41–55 – DOI:10.17212/1727-2769-2023-2-41-55.
23. Gianto R. Distributed generation in electric power systems: An overview and important issues / R. Gianto, M.I. Arsyad, Purwoharjono, F. Imansyah, K.H. Khwee // 2022 WSEAS transactions on power systems. – WSEAS, 2022 – Vol. 18 – P. 172-178 – DOI:10.37394/232016.2023.18.18
24. Olanrewaju O. Decentralized and distributed power generation / O. Olanrewaju, M.J. Barasa Kabeyi // 2023 Proceedings of the 5 African international conference on industrial engineering and operations management. – IEOM Society international, 2023 – DOI:10.46254/AP04.20230268.
25. Kotin D.A. Ispol'zovanie odnofaznogo sinkhronnogo mnogoobmotochnogo generatora s postoyannymi magnitami dlya elektrosnabzheniya avtonomnogo potrebitelya / D.A. Kotin, I.A. Ivanov // 2022 Izvestiya vysshihkh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki, 2022. – T. 24. – №1. – S. 29-38. DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-1-29-38.
26. Sorokina D.S. Trudnosti vnedreniya istochnikov raspredelennoi generatsii i puti ikh resheniya s ispol'zovaniem adaptivnoi releinoi zashchity i avtomatiki / D.S. Sorokina, I.N. Gladkov // 2022 Materialy XIV Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchnoi konferentsii «Studencheskii nauchnyi forum». – URL: <https://scienceforum.ru/2022/article/2018029576> (data obrashcheniya 02.06.2024).

27. Alvarez de Sotomayor A. IEC 61850-based adaptive protection system for the mv distribution smart grid / A. Alvarez de Sotomayor, D. Della Giustina, G. Massa, A. Dedè, F. Ramos, A. Barbato // 2017 Sustainable energy, grids and networks journal. – SEGAN, 2017 – DOI:10.1016/j.segan.2017.09.003.
28. Kotov A.A. Primenenie generatora dvoynogo pitaniya dlya vetroenergeticheskikh ustanovok maloi, srednei i bol'shoi moshchnosti / A.A. Kotov, N.I. Neustroev // Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika». – Yuzhno-Ural'skii gosudarstvennyi universitet, 2017. – T. 17 – № 4. – S. 80–89 – DOI: 10.14529/power170409.
29. Chi Y. Multi-stage coordinated dynamic VAR source placement for voltage stability enhancement of wind-energy power system / Y. Chi, Y. Xu // 2020 IET Generation, Transmission & Distribution. – Vol. 14 – P. 931–1167 – DOI: 10.1049/iet-gtd.2019.0126www.ietdl.org.
30. Patel H. Analyse the impact of distributed generation units on distribution system performances / H. Patel, B.K. Saw, A.K. Bohre, O. Yadav // 2023 IEEE International conference on power electronics, smart grid and renewable energy. – PESGRE, 2023 – DOI:10.109/PESGRE.58662.2023.10404345.
31. Quispe J.C. Transmission line protection challenges influenced by inverter-based resources: a review / J.C. Quispe, E. Orduna // 2022 Protection and Control of Modern Power Systems. – 2022 – DOI:10.1186/s41601-022-00249-8.
32. Hida A. Impact of the distributed generation on the power quality indicators of the distribution network, A case study in Korça / A. Hida, R. Bualoti, M. Celo, M. Hysenbegasi // 2023 16th International scientific conference of energy and climate change. – ISCECC, 2023.
33. Petrosyan N. Osnovnye printsipy sozdaniya preobrazovatelei postoyannogo napryazheniya v stabilizirovannoe peremennoe napryazhenie sinusoidal'noi formy setevoi chastoty / N. Petrosyan, D. Kirakosyan // 2013 zhurnal «Silovaya elektronika». – T.6 – №45 – S.79-84.1
34. Ivanova V.R. Strukturnyi i parametricheskii sintez algoritmov protivovariinogo upravleniya dlya realizatsii adaptivnoi chastotnoi delitel'noi avtomatiki elektrotekhnicheskikh sistem. / V.R. Ivanova, I.Yu. Ivanov, V.V. Novokreshchenov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki. 2019. – T. 21 – № 4 – S. 66-76 – DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-4-66-76.
35. Takele H.M. Increment of fault current due to integration of distributed generation and its impact on distribution network protection / H.M. Takele // 2021 Research square journal. – RS, 2021 – DOI:10.21203/rs.3.rs-968650/v1.
36. Maharmi B. Integration of photovoltaic distributed generation in grid distribution network: A literature review / B. Maharmi, Syafii, A.A. Zakri // 2023 Andalasian international journal. – AIJASET, 2023 – Vol. 3 – No. 03 – P. 206-220 – DOI:10.25077/aijaset.v3i3.114.
37. Majeed A.A. A review of protection schemes for electrical distribution networks with green distributed generation / A.A. Majeed, A.S. Altaie, M. Abderrahim, A. Alkhazraji // 2023 Energies. Electrical engineering. – Vol. 16 – No. 22 – P. 7587 – DOI:10.3390/en16227587.
38. Adebayo A.D. An overview of distributed generation on power systems / A.D. Adebayo, J.U. Chinedu // 2022 International journal of frontline research in engineering and technology. – IJFRET, 2022 – Vol. 1 – No. 1 – P. 27-33 – DOI:10.56355/ijfret.2022.1.1.0001.
39. Lestari S.D. Integration of artificial intelligence for enhanced coordination of docr protection in distributed generation systems / S.D. Lestari, Samsurizal, A. Makkulai // 2024 Journal Teknik Electro. – ELKHA, 2024 – Vol. 16 – No. 1 – P. 43 – DOI:10.26418/elkha.v16i1.72876.
40. Anaza S.O. Potential of renewable energy sources for distributed generations: An overview / S.O. Anaza, Y.S. Haruna, A.L. Amoo, A.A. Sadiq, Y.A. Yisah // 2023 International journal of scientific advances. – IJSCIA, 2023 – Vol. 4 – No. 1 – P. 21 – DOI:10.51542/ijscia.v4i1.21.
41. Zayzndehrodi H. Effect of renewable distributed generators on the fault current level of the power distribution systems / H. Zayandehrodi, A. Mohmed, H. Shareef, M. Farhoodnea, M. Mohamadjafari // 2013 Advanced materials research. – AMR, 2013 – DOI:10.4028/AMR.622.623.1882.
42. Omosigno E.O. Distributed generation technology; Advances and development trend / E.O. Omosigno, L.E. Okotie, J. Okoekhan // 2021 International journal of: science research and technology. – TIJSRAT, 2021 – Vol. 6 – No. 9 – DOI:10.13140/RG/2/2/21613/05602.
43. Debadatta A.G. Protection algorithms of microgrids with inverter interfaced distributed generation units – A review / A.G. Debadatta // 2021 Electric power systems research. – EPSR, 2021 – Vol. 192 – No. 11 – DOI:10.1016/j.epr.2020.106986.
44. Vijetha K. Adaptive relaying of radial distribution system with distributed generation / K. Vijetha, K.P. Sharath, M. Matcha // 2013 International Journal of Electrical and Computer Engineering. – IJECE, 2013. – Vol. 3 – № 3 – P. 407-414. DOI:10.11591/ijece.v3i3.2578.
45. Cherevatskiy S. Grid forming energy storage system addresses challenges of grids with high penetration of renewables (a case study) / S. Cherevatskiy, S. Sproul, S. Zabihi, R. Korte, H. Klingenberg, B. Buchholz, A. Oudalov // 2020 CIGRE session 48. – C2 – C6 – 322.

46. Memon A. A. Microgrid Protection with Conventional and Adaptive Protection Schemes / A. A. Memon, H. Laaksonen, K. Kauhaniemi // Microgrids, Power Systems, Springer Nature Switzerland AG, 2021 – DOI:10.1007/978-3-030-59750-4_19.

47. Farkhani J.S. The power system and microgrid protection — A review / J.S. Farkhani, M. Zareein, A. Najafi, R. Melicio, E.M.G. Rodrigues // 2020 Applied Sciences. - Appl. Sci., 2020. – Vol. 10 – № 8271 – P. 1-30. DOI:10.3390/app10228271.

48. Cisneros-Saldana J.I.D. On Protection Schemes for AC Microgrids: Challenges and Opportunities / J.I.D Cisneros-Saldana, S. Samal, M.M. Begovic, S.R. Samantaray // 2024 IEEE Transactions on Industry Applications. – TIA, 2024. – PP(99):1-12. DOI:10.1109/TIA.2024.3353721

49. Khan J.A. Robust Unified Multi Diverse Protection Schemes for Low Voltage Microgrid / J.A. Khan, T. Mahmood // 2023 Journal of Electrical Engineering and Technology. – Vol. 19 - №2 – P.1079-1096. DOI:10.1007/s42835-023-01620-x

50. Chowdhury R. Line Current Differential Protection in Systems With Inverter-Based Resources—Challenges and Solutions / R. Chowdhury, R. McDaniel, N. Fischer // 2023 Conference: 76th Annual Conference for Protective Relay Engineers. DOI:10.2139/ssrn.4058823

Authors of the publication

Marat M. Nadergulov – Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia. nadergulov97@mail.ru

Ruslan G. Isakov – Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia. ruslanisakov@yandex.ru

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено **28.01.2025 г.**

Отредактировано **11.03.2025 г.**

Принято **08.04.2025 г.**



АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ ДСП-30

Бобожанов М.К.¹, Каримов Р.Ч.¹, Попкова О.С.², Туйчиев Ф.Н.¹, Махмутханов С.К.¹

¹Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова,
г. Ташкент, Узбекистан

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
mbobojanov@yahoo.com

Резюме: ЦЕЛЬЮ данной работы является изучение влияния работы дуговой печи ёмкостью 30 тонн на показатели качества электроэнергии путём проведения экспериментальных исследований в плавильном цеху предприятия «Li Da Metal Technology», расположенного в городе Ахангаране. Объектом изучения является дуговая печь ДСП-30, которая питается от печного трансформатора мощностью 30 кВА. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье приводятся результаты экспериментальных исследований по изучению влияния электродуговой печи ДСП-30 на работу электрической сети в плавильном цеху предприятия СП ООО «Li Da Metal Technology» и на подстанции «Саноат», обеспечивающей электроэнергией плавильный цех. Были сняты осциллограммы изменения напряжения и тока до и во время процесса плавки. Полученные осциллограммы анализировались методом быстрого разложения в ряд Фурье (Fast Fourier Transformation). ЗАКЛЮЧЕНИЕ. На основе анализа результатов, полученных путем экспериментальных исследований, можно заключить, что электродуговые печи являются мощными нелинейными потребителями с динамически изменяющейся электрической нагрузкой. При работе печи в режиме плавки показатели качества напряжения и тока резко ухудшаются, а форма кривых резко отличаются от синусоидальной. Эффекты ухудшения показателей качества электроэнергии отчетливо проявляются во вторичной обмотке печного трансформатора, а в шинах промышленной подстанции, питающей станцию электроэнергией эти эффекты проявляются в гораздо более затухающем состоянии и могут быть зарегистрированы специальными анализаторами и осциллографами. При работе дуговой печи в режиме плавления величина напряжения отличается от номинального значения от 300 до 500 Вольт. Если устройство компенсации реактивной мощности SVG не подключено в динамическом режиме, отклонение напряжения может достигать 5000 В. В заключение следует отметить, что электродуговая печь как нелинейный и сильно меняющийся потребитель оказывает существенное влияние на ухудшение качественных показателей электроэнергии. С точки зрения теории показателей качества электрической энергии данная ситуация является ярким примером негативного влияния на качественные показатели источника питания со стороны потребителя.

Ключевые слова: дуговая печь; показатели качества электроэнергии; короткая сеть; негативное влияние на сеть; высшие гармоники.

Для цитирования: Бобожанов М.К., Каримов Р.Ч., Попкова О.С., Туйчиев Ф.Н., Махмутханов С.К. Анализ результатов экспериментальных исследований дуговой печи ДСП-30 // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 126-137. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-126-137.

ANALYSIS OF THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE ARC FURNACE DSP-30

Bobojanov M.K.¹, Karimov R.Ch.¹, Popkova O.S.², Tuychiev F.N.¹, Makhmutkhanov S.K.¹

¹Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
mbobojanov@yahoo.com

Abstract: *THE PURPOSE* of this work is to study the influence of the operation of an arc furnace with a capacity of 30 tons on the quality of electricity by conducting experimental studies in the melting shop of the «Li Da Metal Technology» enterprise located in the city of Akhangaran. The object of study is the DSP-30 arc furnace, which is powered by a 30 kVA furnace transformer. *RESULTS.* The article presents the results of experimental studies to study the influence of the DSP-30 electric arc furnace on the operation of the electrical network in the smelting shop of the «Li Da Metal Technology» LLC JV enterprise and at the “Sanoat” substation, which supplies the smelting shop with electricity. Oscillograms of voltage and current changes were recorded before and during the melting process. The resulting oscillograms were analyzed using the Fast Fourier Transformation method. *CONCLUSION.* Based on the analysis of the results of the above experimental studies, we can conclude the following: Electric arc furnaces are powerful nonlinear consumers with a dynamically changing electrical load. Therefore, when the furnace is operating in the melting mode, the voltage and current quality indicators sharply deteriorate, and the shape of the curves differs sharply from sinusoidal; The effects of deterioration in power quality indicators are clearly manifested in the secondary winding of a furnace transformer, in the buses of an industrial substation that supplies the station with electricity, then these effects appear in a much more damped state and can be recorded by special analyzers and oscilloscopes; When an electric arc furnace is operating in melting mode, the voltage value differs from the nominal value from 300 to 500 Volts. If the SVG power factor compensation device is not connected in dynamic mode, the voltage deviation can reach 5000 V. In conclusion, it should be noted that the electric arc furnace, as a nonlinear and highly variable consumer, has a significant impact on the deterioration of the quality indicators of electricity. From the point of view of the theory of electric energy quality indicators, this situation is a clear example of the negative impact on the quality indicators of a power source from the consumer.

Keywords: arc furnace; power quality indicators; short network; negative impact on the network; higher harmonics.

For citation: Bobojanov M.K., Karimov R.Ch., Popkova O.S., Tuychiev F.N., Makhmutkhanov S.K. Analysis of the results of experimental studies of the arc furnace DSP-30. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (2): 126-137. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-126-137.

Введение (Introduction)

Анализ современного состояния проблемы.

Как известно, мощные нелинейные потребители электроэнергии оказывают негативное влияние на качество электроэнергии в электрических сетях. Данное явление определяется так называемым вкладом со стороны динамически меняющимся потребителем электроэнергии [1-3].

Мощные дуговые печи для плавки стали являются резкопеременной нагрузкой для сети, которые работают в динамических режимах. Напряжение на выходе короткой сети меняется очень динамично в процессе плавления металлолома в дуговой печи [1, 3-4].

Изучению показателей качества электроэнергии, их роли в повышении эффективности производства и продлении срока службы электрического оборудования, а также необходимости совершенствования международных норм и правил для подключения источников электроэнергии и потребителей к общим точкам подключения посвящены научные работы профессора Дрезденского технического университета Яна Майера [5].

В них всесторонне изучено текущее состояние качества электроэнергии и его значение для системы электроснабжения, раскрыт механизм влияния нелинейных потребителей на качество электроэнергии, а также проведены исследования качества электроэнергии в различные временные интервалы. Кроме того, в настоящее время, в связи с увеличением потребления электрической энергии нелинейными электрическими устройствами в системе электроснабжения, в сети возникают высшие гармоники тока и напряжения с частотой до 150 кГц. По этой причине отдельно рассмотрены частотные диапазоны от 50 Гц до 2 кГц и от 2 кГц до 150 кГц. Результаты исследований основаны на 20-летних изысканиях в низковольтных электрических сетях [6].

Кроме того, в этом направлении широко освещены исследования профессора Марка Халпина (США) из Университета Алабамы, профессора Игора Папича из Люблянского Технического университета (Словения) и других ученых [7].

В направлении разработки методов оценки влияния напряжения несимметрии и несинусоидальности на электрических потребителей проведен ряд научных исследований немецким профессором П.Шегнер, а также российскими учеными Д.С.Федосовым, А.Н.Черненко и Н.А.Новоселовым. Их исследования направлены на глубокое изучение влияния таких параметров, как несимметрии и несинусоидальность напряжение, на качество электроэнергии. Кроме того, разработанные этими учеными методы оценки служат основой для минимизации негативного воздействия потребителей на электрические сети и повышения эффективности системы электроснабжения [8].

Научные исследования профессора Д.С.Федосова направлены на разработку методологии оценки влияния потребителей на показатели качества электроэнергии в системах электроснабжения. В его работах разработан метод оценки влияния на качество электроэнергии путем анализа различных комбинаций параметров потребителей и систем электроснабжения. Также, с целью повышения эффективности экспериментального определения параметров схем замещения систем электроснабжения были разработаны алгоритмы обработки режимных параметров [8].

Был разработан специальный метод нормализации токов искажений, возникающих из-за нелинейных и несимметричных нагрузок, с учетом их показателей мощности. Результаты данного исследования представляют собой один из важных шагов, направленных на повышение надежности и эффективности систем электроснабжения [9].

Исследования А.Н.Черненко были направлены на создание динамической модели электрической дуги с использованием программы MathLab, а также на разработку метода расчета уровня высших гармоник, генерируемых электродуговыми печами. В ходе исследований были проанализированы методы определения и нормализации несинусоидальности кривой напряжения, а также изучены коэффициент несинусоидальности и значения отдельных гармоник на основе экспериментальных данных [10].

В научных работах Н. А. Новоселова представлены усовершенствованные методы определения и оценки показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения, содержащих маломощные электродуговые сталеплавильные печи (ДСП). Его исследования направлены на разработку более эффективных и точных методов снижения искажений в системах электроснабжения и выявления факторов, влияющих на качество электроэнергии. Эти методы способствуют повышению надежности электроснабжения и минимизации негативного воздействия маломощных сталеплавильных печей на общую электрическую сеть. В рамках исследования были проанализированы существующие методы оценки уровня высших гармоник в системах электроснабжения промышленных предприятий, использующих ДСП. Выявлены недостатки, влияющие на точность расчета коэффициента искажений синусоидальной формы напряжения, а также разработан усовершенствованный метод расчета коэффициента несинусоидальности. Для приведения выявленного коэффициента несинусоидальности к допустимым значениям предложен усовершенствованный метод выбора количества и параметров резонансных силовых фильтров [11].

Исследованию влияния электродуговых печей на сеть электроснабжения и разработке методов его снижения посвятили свои научные работы такие ученые, как В.И.Кочкин, О.П.Нечаев, Б.Д.Жохов, В.П.Рубцов, А.Р.Минеев, Г.Я.Вагин, Л.А.Кучумов, В.М.Салтыков, И.В.Жежеленко, В.Gyugyi, N.O.Hingoran. В Узбекистане были проведены исследования по прогнозированию потребления электроэнергии электродуговыми печами [12-14].

Румынские ученые Horia Andrei, Costin Cepisca и Sorin Grigorescu проводили научные исследования по изучению негативного влияния электродуговых сталеплавильных печей на качество электроэнергии. В их работах особое внимание уделено нелинейной природе электродуговых печей, а также использованы различные методы моделирования для изучения высших гармоник, возникающих в процессе работы электродов [15]. Предложены методы определения высших гармонических токов, возникающих в общей точке подключения электродуговых сталеплавильных печей, а также более точные методы исследования коэффициентов несинусоидальности.

Однако в проведенных исследованиях детально не изучены показатели качества электроэнергии, особенно влияние электродуговых сталеплавильных печей на систему электроснабжения. Исходя из вышеизложенного анализа, можно отметить, что, несмотря на достигнутые определенные успехи в данной области, необходимо более глубокое исследование негативного воздействия электродуговых печей на систему электроснабжения. В частности, не до конца изучены вопросы оценки влияния нелинейных потребителей на качество напряжения в общей точке подключения, а также определения

вклада каждого нелинейного потребителя, подключенного к системе электроснабжения, в коэффициент несинусоидальности. Исследования в этом направлении послужат важной научной основой для повышения эффективности и устойчивости систем электроснабжения.

Постановка задачи исследования

Актуальность задачи. В последнее время приходится считаться и с высшими гармониками (ВГ), генерируемыми дуговыми сталеплавильными печами (ДСП), так как растет производство стали в дуговых электропечах и их мощность. В республике функционирует и строятся металлургические комбинаты, где в плавильных цехах используются дуговые сталеплавильные печи различных мощностей и типов. Несинусоидальные режимы оказывают негативное воздействие на силовое оборудование, на систему релейной защиты, автоматики и телекоммуникации. Экономический ущерб, возникающий в результате воздействия высших гармоник, обусловлен ухудшением энергетических показателей и сокращением срока службы электрооборудования, общим снижением надежности функционирования электрических сетей. В отдельных случаях возможно ухудшение качества и снижение количества выпускаемой продукции. Поэтому актуальным является обеспечение электромагнитной совместимости электрооборудования при снижении затрат на обеспечение качества электроэнергии [4, 16].

Важность задачи. Изучение влияния дуговых печей на показатели качества электроэнергии и принятие мер по их улучшению будет способствовать уменьшению потерь электроэнергии, удлинению срока службы электрооборудования и повышению надёжности функционирования электрических сетей.

Цель данной работы. Целью данной работы является изучение влияния работы дуговой печи ёмкостью 30 тонн на показатели качества электроэнергии путём проведения экспериментальных исследований в плавильном цеху предприятия «Li Da Metal Technology», расположенного в городе Ахангари. Объектом изучения была дуговая печь ДСП 30, которая питается от печного трансформатора мощностью 30 кВА.

Материалы и методы (Materials and methods)

Были проведены экспериментальные исследования по изучению влияния электродуговой печи ДСП-30 на работу электрическую сети в плавильном цеху предприятия СП ООО «Li Da Metal Technology» и на подстанции «Саноат», обеспечивающей электроэнергией плавильный цех. Были сняты осциллограммы изменения напряжения и тока до и во время процесса плавки.

Полученные осциллограммы анализировались методом быстрого разложения в ряд Фурье (Fast Fourier Transformation).

Результаты и их обсуждение (Results and Discussions)

На рисунке 1 показан монитор контроля производительности системы визуализации печи ДСП-30.

Здесь видно, что электроды, являющиеся основными элементами ДСП, как правило, соединены со вторичной обмоткой печного трансформатора, перемещаются по вертикали с помощью гидравлической системы, и эти перемещения отображаются на мониторе. Печной трансформатор подключается к сети через реактор и элегазовый выключатель. Изменение токов, протекающих по фазам, с течением времени отображается через окно OnlineTrendControl [3, 17-19]. Кроме того, через систему визуализации можно видеть и контролировать изменения многих параметров.

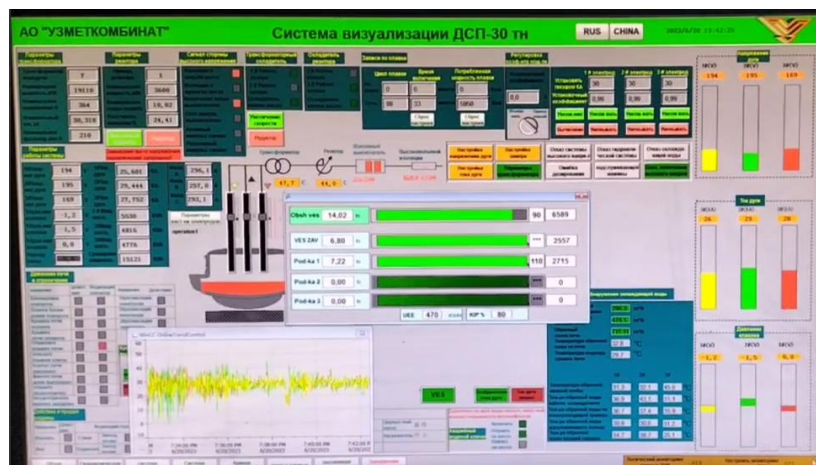


Рис. 1. Система визуализации работы печи ДСП-30

Fig. 1. Visualization system for the operation of the DSP-30 furnace

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

На рисунке 2 показаны графики изменения токов во времени в фазах ДСП через окно OnlineTrendControl. Из этого графика видно, что на этапе плавки, то есть когда печь работает с очень большой нагрузкой, токи принимают большие значения и они резко отличаются друг от друга. Например, в момент времени 19:34 ток второй фазы (зеленый) превышает значение 40 кА, а в 19:40 его значение близок к 36 кА. В эти же моменты значение тока в первой фазе А составляет от 36 кА до 6 кА в 19:34 и около 30 кА в 19:40 [9].

Следующая фаза плавления металла закончилась в 19:43, и это явление объясняется тем, что графики фазных токов резко изменяются до нуля. После небольшой паузы, т.е. после загрузки печи металлоломом для последующей плавки, процесс продолжается снова.

Следует отметить, что значения плавильных токов и времени плавления зависят от расплавляемых состава металлолома (железа, чугуна и др.), степени их уплотнения и рядом параметров [18-20].

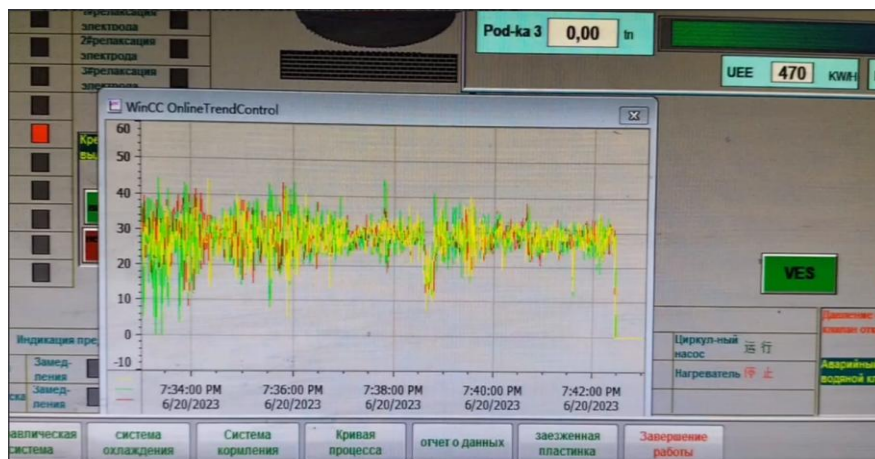


Рис. 2. Изменение фазных токов в фазах ДСП на OnlineTrendControl Fig. 2. Change of phase currents in phases of arc steel-smelting furnaces on OnlineTrendControl

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

С использованием анализатора AP-6 Circutor были сняты осциллограммы изменения фазных напряжений на короткой сети печного трансформатора, который питает ДСП 30 установленный в плавильном цеху ООО "Li Da Metal Technology". В процессе плавки были получены осциллограммы изменения напряжений (рис.3) [1-3].

Амплитуды высших гармоник, содержащихся в этой осциллограмме, были определены путем разложения в ряд Фурье графика изменения напряжения в одной фазе на этой осциллограмме.

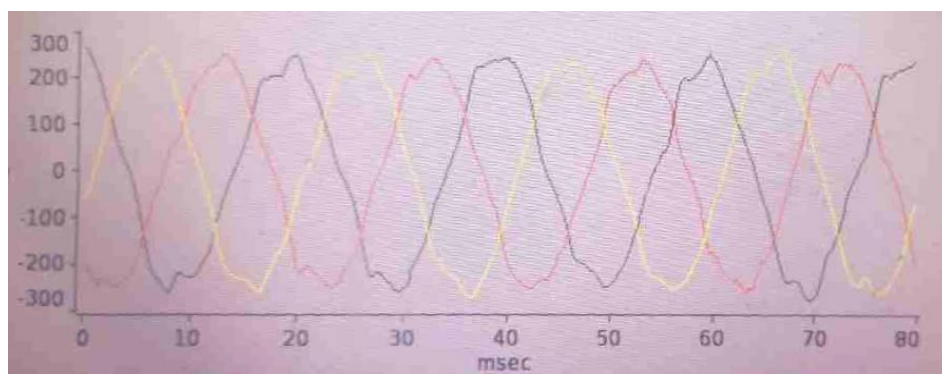


Рис. 3. Осциллограммы изменения напряжения на короткой сети электродуговой печи ДСП-30 Fig. 3. Oscillograms of voltage changes on a short network of an electric arc furnace DSP-30

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

На рисунке 4. показаны гармонический состав высших гармонических в кривой напряжения одной фазы короткой сети в схеме электроснабжения дуговой печи ДСП-30 и диаграмма высших гармонических. Как видно, кривая напряжения помимо основной гармоники содержит 2, 3, 5, 6 и другие гармоники [19-21].



Рис. 4. Гармонический состав и диаграмма высших гармонических в кривой напряжения на короткой сети печи ДСП-30

Fig. 4. Harmonic composition and diagram of higher harmonics in the voltage curve on a short network of the DSP-30 furnace

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

Из таблицы можно увидеть, что величина тока соответствующая первой гармонике равна 78,362 ампер, ток второй гармоники равен 8,836 ампер, что составляет 11,276% от основной гармоники. Величина тока третьей гармоники составляет 19,206 ампер, в процентах – 24,509%, ток пятой гармоники – 11,286 Ампер (в процентах 14,4%). Для следующих порядков гармоник соответствует следующее: ток седьмой гармоники – 6,913 ампер (8,822%), восьмой гармоники 9,245 ампер (11,797%), девятой гармоники – 3,618 ампер (4,617%) и 10-ой гармоники 5,584 ампер (7,126%) и т.д.

Одним словом в спектре высших гармонических, соответствующем кривой напряжения на выходе печного трансформатора для ДСП-30 содержатся высшие гармоники, кроме 4-ой гармоники и при работе дуговой печи в режиме плавления высшие гармоники оказывают негативное влияние на питающую сеть [17-20].

Осциллограммы изменения напряжения и тока в режиме работы ДСП

На рисунке 5 показаны осциллограммы изменения напряжения на 3-х фазах при работе электродуговой печи в нормальном режиме работы. Данные осциллограммы были сняты на подстанции «Саноат», которое питает предприятие «Li Da Metal Technology» в городе Ахангадане.

Из этого рисунка видно, что почти все значения фазного напряжения составляют 20,475 кВ и сдвинуты по фазе на 120° . В идеальном случае фазное напряжение в сети 35 кВ равно 20,234 кВ.

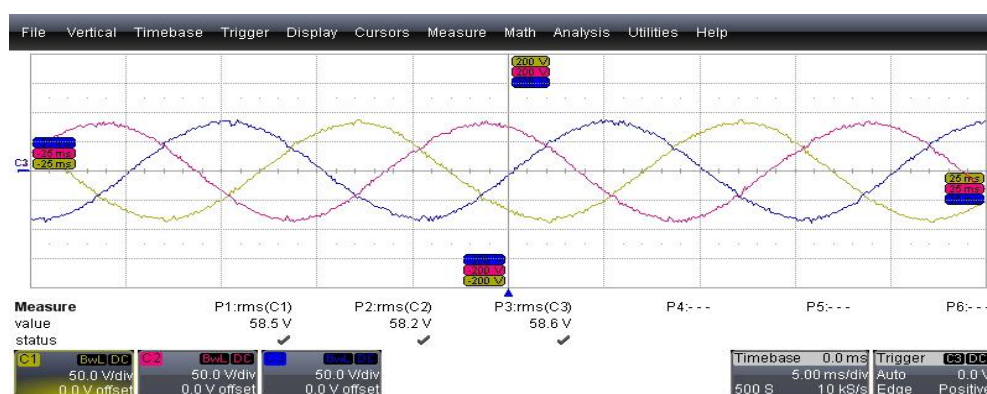


Рис. 5. Осциллограмма трехфазного напряжения в нормальном режиме работы

Fig. 5. Oscillogram of three-phase voltage in normal operation

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

На рисунке 6 представлена осциллограмма изменения напряжения в одной фазе при работе электродуговой печи в нормальном режиме работы. На этой осциллограмме также видно, что на графике изменения напряжения присутствуют небольшие пульсации, и они тесно связаны с наличием в сети нелинейных элементов и резкими изменениями электрических параметров.

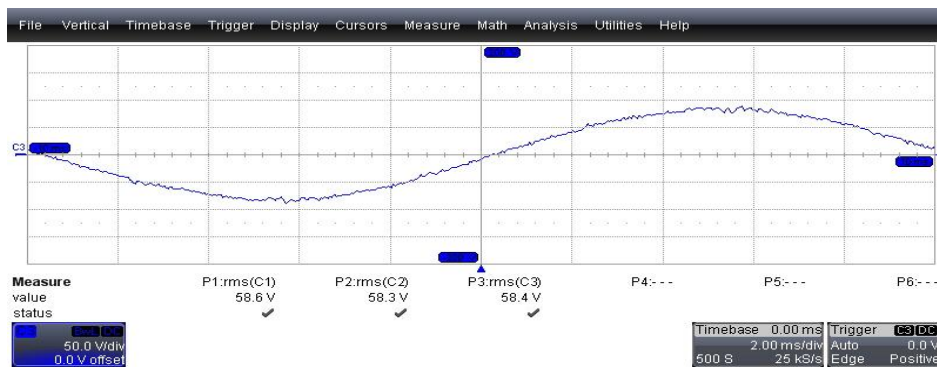


Рис. 6. Осциллограмма однофазного напряжения в режиме холостого хода

Fig. 6. Oscillogram of single-phase voltage in no-load mode

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

В начале данной статье упоминалось, что присутствующий в системе электроснабжения нелинейный элемент оказывает негативное влияние на остальных потребителей через шины. Вышеописанная ситуация актуальна и для этой системы, что подтверждают полученные осциллограммы изменения напряжения и тока при нахождении ЭДП в режиме плавки [4-7, 10].

Осциллограммы изменения напряжения и тока были получены с помощью осциллографа типа LeCroy WaveRunner при работе ДСП-30 грузоподъемностью 30 тонн в режиме плавки металла.

На рисунке 7 показаны кривые изменения фазного тока в режиме плавки металла.

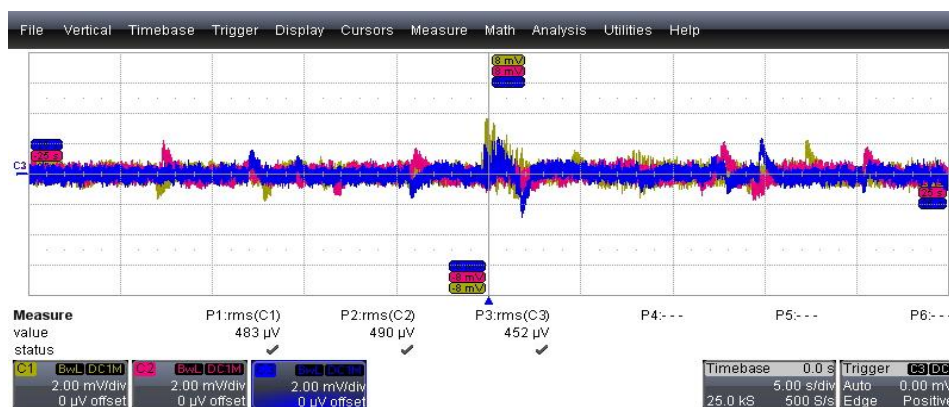


Рис. 7. Осциллограмма изменения тока

Fig. 7. Oscillogram of current change

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

Первая фаза (A) выделена фиолетовым цветом, вторая фаза (V) – розовым и третья фаза – желтым. Из этих осциллограмм видно, что изменения токов имеют резкий и неповторимый характер. Кроме того, изменение фазных токов отличается от синусоидальной по форме.

Используя быстрое преобразование Фурье, доступное в функциях осциллографа типа LeCroy WaveRunner, графики токов были разложены в ряд Фурье и получен график, представленный на рисунке 8 ниже.

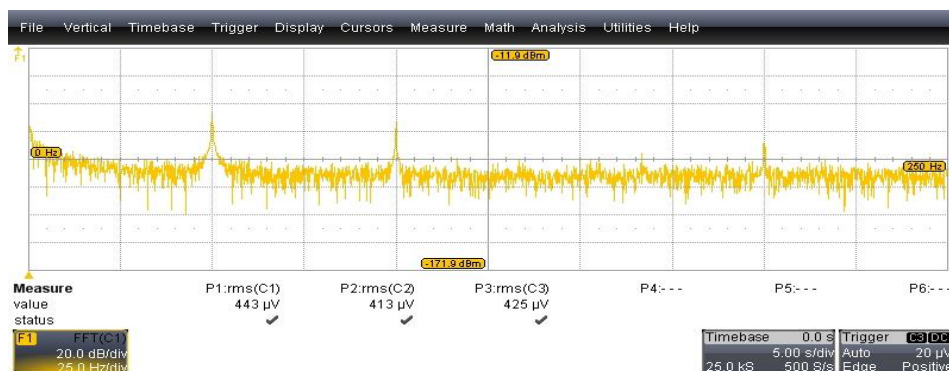


Рис. 8. Распространение тока ЭДП на ряд Фурье (Fast Fourier Transformation)

Fig. 8. Propagation of electric arc furnace current to the Fourier series (Fast Fourier Transformation)

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

Из этого графика видно, что на кривых токов выделяются первая, вторая и четвертая гармоники, т.е. их амплитуды больше остальных гармоник.

На рисунке 9 показаны осциллограммы изменения фазных напряжений в процессе работы печи, т.е. при плавке металлолома.

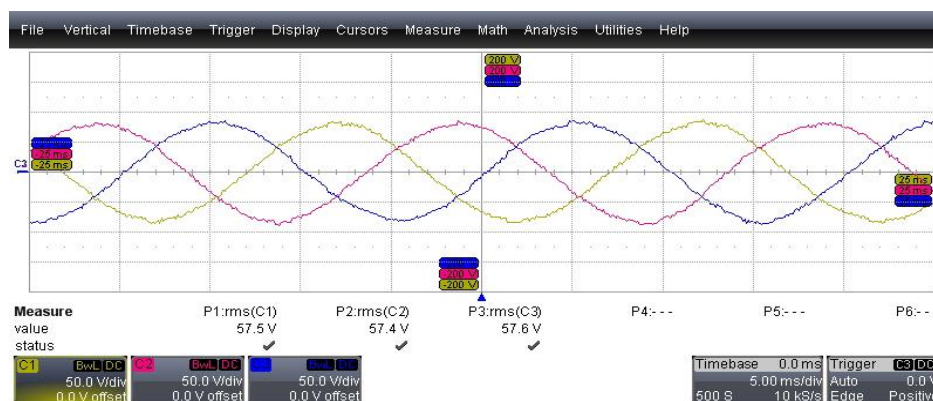


Рис. 9. Осциллограммы напряжения в режиме плавки ЭДП

Fig. 9. Voltage oscillograms in the melting mode of electric arc furnaces

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

Из рисунка видно, что работа печи не оказывает сильного влияния на форму фазных напряжений. Это можно объяснить наличием реактора с высокой индуктивностью, подключенного к системе электроснабжения, и устройства компенсации реактивной мощности SVG, подключенного к сети в динамическом режиме. Фазное напряжение не сильно отличается по величине [3-4, 17-18].

С помощью быстрого преобразования Фурье осциллограммы напряжения, доступного в функциях осциллографа типа LeCroy Wave Runner, графики изменения тока были разложены в ряд Фурье и получен график, представленный на рисунке 10 ниже.

Из графика видно, что на кривых напряжения хорошо видны по величине первая, вторая и третья гармоники. Следует подчеркнуть, что эти эксперименты проводились в условиях, когда электродуговая печь не работала при очень большой нагрузке. Поэтому резких различий в кривых тока и тем более напряжения не заметно. Как упоминалось в статье, при регистрации изменения напряжения во вторичной обмотке короткого замыкания печного трансформатора, расположенного в литейном цехе, с помощью анализатора AR6, можно было увидеть, что напряжение в трех фазах резко изменилось с точки зрения амплитуда и форма [1, 17-20].

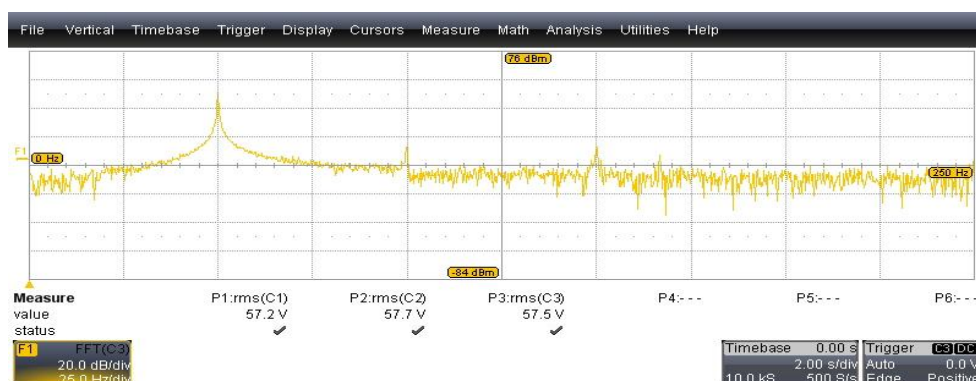


Рис. 10. Распространение кривой изменения напряжения по линии Фурье (Fast Fourier Transformation)

Fig. 10. Propagation of the voltage change curve along the Fourier line (Fast Fourier Transformation)

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

Выводы (Conclusions)

На основе анализа результатов приведенных выше экспериментальных исследований можно прийти к следующему выводу:

1. Электродуговые печи являются мощными нелинейными потребителями с динамически изменяющейся электрической нагрузкой. Поэтому при работе печи в режиме плавки показатели качества напряжения и тока резко ухудшаются, а форма кривых резко отличаются от синусоидальной;

2. Эффекты ухудшения показателей качества электроэнергии отчетливо проявляются во вторичной обмотке печного трансформатора, на шинах промышленной подстанции, питающей станцию электроэнергией, то эти эффекты проявляются в гораздо более затухающем состоянии и могут быть зарегистрированы специальными анализаторами и осциллографами;

3. При работе электродуговой печи в режиме плавления величина напряжения отличается от номинального значения от 300 до 500 вольт. Если устройство компенсации реактивной мощности SVG не подключено в динамическом режиме, отклонение напряжения может достигать до 5000 В.

В заключение следует отметить, что электродуговая печь как нелинейный и сильно меняющийся потребитель оказывает существенное влияние на ухудшение качественных показателей электроэнергии. С точки зрения теории показателей качества электрической энергии данная ситуация является ярким примером негативного влияния на качественные показатели источника питания со стороны потребителя.

Литература

1. Zbigniew Łukasik and Zbigniew Olczykowski, (2020). *Estimating the Impact of Arc Furnaces on the Quality of Power in Supply Systems*. Energies 2020, 13, 1462; <https://doi.org/10.3390/en13061462>
2. Z. Olczykowski, (2018). *The Influence of Disturbances Generated by Arc Furnaces on the Power Quality*. World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Energy and Power Engineering. Vol.12, №9, 2018. DOI:10.5281/zenodo.1474626
3. Ю.А.Сычев, Р.Ю.Зимин, (2021). *Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения минерально-сырьевого комплекса гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами*. Записки Горного института. 2021. Т.247. С.132-140. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14
4. М.К.Бобожанов, С.Махмутханов, С.Айтбаев, (2023), *Investigation of the Problems Non-Sinusoidal of the Voltage Form*. Investigation of the Problems Non-Sinusoidal of the Voltage Form. AIP Conf.: Proceedings 2552, 2023, 05011. <https://doi.org/10.1063/5.0113890>
5. Thomas Hay, Ville-Valtteri Visuri, Matti Aula, and Thomas Echterhof, (2020). *A Review of Mathematical Process Models for the Electric Arc Furnace Process*. Advanced science news. Steel research int. 2020, 2000395, pp.1-22. <https://doi.org/10.1002/srin.202000395>
6. Maciej Klimas; Dariusz Grabowski, and all Authors, (2023). *Analysis of correlations between electric arc furnace model coefficients*. 2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe. DOI: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194885
7. A. Bracale, P. Caramia, P. D. Falco, G. Carpinelli and A. Russo, (2020). *DC electric arc furnace modelling for power quality indices assessment*. 2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp. 1-6
8. T.A.C. Maia and V.C.Onofri, (2022). *Survey on the electric arc furnace and ladle furnace electric system*. Ironmaking & Steelmaking, vol. 49, no. 10, pp. 976-994
9. M.Cernan, Z.Muller, J.Tlusty and V.Valouch, (2021). *An improved SVC control for electric arc furnace voltage flicker mitigation*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 129, pp. 106831.
10. B.S.Jebaraj, J.Bennet, R.Kannadasan, M.H.Alsharif, M.-K.Kim, A.A.Aly, et al., (2021). *Power quality enhancement in electric arc furnace using matrix converter and Static VAR Compensator*. Electronics, vol. 10, no. 9, 2021.
11. А.Николаев, П.Тулупов, А.Денисевич и С.Рыжовол, (2021). *Анализ гармонического состава токов и напряжений дуг в дуговой сталеплавильной печи с использованием математической модели*. Вестник Южно-Уральского государственного Университета. Серия: «Энергетика». 21, 2 (апр. 2021), 72–84. <https://doi.org/10.14529/power210208>
12. V.Y.Ushakov, A.V.Mytnikov, I.U.Rakhmonov, (2023). *Traditional Electrical Diagnostic Methods*. Power Systems, 2023, Part F1292, pp. 179–197.
13. I.U.Rakhmonov, F.A.Hoshimov, N.N.Kurbonov, D.A.Jalilova, (2022). *Optimization of the Modes of Electric Loads of Power-consuming Units Operating in Different Production Modes*. AIP Conference Proceedings, 2022, 2552, 050022. <https://doi.org/10.1063/5.0112391>
14. I.U.Rakhmonov, V.Ya.Ushakov, N.N.Niyozov, N.N.Kurbonov, M.Mamutov, (2021). *Energy saving in industry*. E3S Web of Conferences, 2021, 289, 07014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128907014>
15. I.Rakhmonov, A.Berdishev, B.Khusanov, U.Khaliknazarov, U.Utegenov, (2020). *General characteristics of networks and features of electricity consumers in rural areas*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 883(1), 012104.

16. М.М.Камолов, Ш.Дж.Джураев, С.Т.Исмоилов, С.А.Абдулкеримов, Х.Б.Назирова, (2020). *Учёт несинусоидального/несимметричного режима работы электрической сети коммунально-бытового назначения при расчете уровня тока нулевого проводника*. Электричество. - М.: 2020; 1: С.35-43.
17. М.М.Камолов, Х.Б.Назирова, С.Т.Исмоилов, Ш.Дж.Джураев, А.С.Амирханов, (2019). *Экспериментальная оценка качества электрической энергии современных коммунально-бытовых и офисных электроприемников*. ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК. Серия: Инженерные исследования. 2019; 2(46): 26-33.
18. М.К.Бобожанов, А.Расулов, С.Махмудхонов, (2022) *Оценка несинусоидальности напряжения по мощности потребителя*. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГО- И РЕСУРСО-СБЕРЕЖЕНИЯ. – Т.: Специальный выпуск (№83). 2022; 177-182.
19. Amarjeet Singh, Ravindra Kumar Singh, Asheesh Kumar Singh, (2017). *Power Quality Issues of Electric Arc Furnace and their Mitigations -A Review*. International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS). Vol-4, Issue-4, Apr- 2017. <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.4.4.4>
20. Andriy Lozynskyy, Jacek Kozyra, and all authors, (2022). *A Mathematical Model of Electrical Arc Furnaces for Analysis of Electrical Mode Parameters and Synthesis of Controlling Influences*. Energies 2022, 15, 1623. <https://doi.org/10.3390/en15051623>

Авторы публикации

Бобожанов Максуд Каландарович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9655-2683>. E-mail: mbobojanov@yahoo.com

Каримов Рахматилло Чориевич – д-р философии (PhD) по техн. наукам, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0129-5643>. E-mail: rahmatillo82@mail.ru

Попкова Оксана Сергеевна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3007-6853>. E-mail: oksiniy@mail.ru

Туйчиев Фуркат Нумонович – д-р философии (PhD) по техн. наукам, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0047-7066>. E-mail: tuychievfn@gmail.com

Махмудханов Султонхужа Камолхужа угли – ассистент кафедры «Электроснабжение» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-4097>. E-mail: sultonmk@mail.ru

References

1. Zbigniew Łukasik and Zbigniew Olczykowski, (2020). *Estimating the Impact of Arc Furnaces on the Quality of Power in Supply Systems*. Energies 2020, 13, 1462; <https://doi.org/10.3390/en13061462>
2. Z.Olczykowski, (2018). *The Influence of Disturbances Generated by Arc Furnaces on the Power Quality*. World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Energy and Power Engineering. Vol.12, №9, 2018. DOI:10.5281/zenodo.1474626
3. Yu.A.Sychov, R.Yu.Zimin, (2021). *Improvement of Power Quality in Power Supply Systems of the Mineral Resource Complex Using Hybrid Filter Compensation Devices*. Journal of Mining Institute. 2021. Vol. 247. pp. 132-140. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14
4. M.K.Bobojanov, S.Mahmutkhonov, S.Aytbaev, (2023), *Investigation of the Problems Non-Sinusoidal of the Voltage Form*. Investigation of the Problems Non-Sinusoidal of the Voltage Form. AIP Conf.: Proceedings 2552. 2023, 05011. <https://doi.org/10.1063/5.0113890>
5. Thomas Hay, Ville-Valtteri Visuri, Matti Aula, and Thomas Echterhof, (2020). *A Review of Mathematical Process Models for the Electric Arc Furnace Process*. Advanced science news. Steel research int. 2020, 2000395, pp.1-22. <https://doi.org/10.1002/srin.202000395>

6. Maciej Klimas; Dariusz Grabowski, and all Authors, (2023). *Analysis of correlations between electric arc furnace model coefficients*. 2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe. DOI: [10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194885](https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194885)
7. A. Bracale, P. Caramia, P. D. Falco, G. Carpinelli and A. Russo, (2020). *DC electric arc furnace modelling for power quality indices assessment*. 2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp. 1-6
8. T.A.C. Maia and V.C. Onofri, (2022). *Survey on the electric arc furnace and ladle furnace electric system*. Ironmaking & Steelmaking, vol. 49, no. 10, pp. 976-994
9. M. Cernan, Z. Muller, J. Tlustý and V. Valouch, (2021). *An improved SVC control for electric arc furnace voltage flicker mitigation*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 129, pp. 106831.
10. B.S. Jebaraj, J. Bennet, R. Kannadasan, M.H. Alsharif, M.-K. Kim, A.A. Aly, et al., (2021). *Power quality enhancement in electric arc furnace using matrix converter and Static VAR Compensator*. Electronics, vol. 10, no. 9, 2021.
11. A. Nikolaev, P. Tulupov, A. Denisevich, and S. Ryzhevolskiy (2021). *Analysis of the Harmonic Composition of Currents and Voltages of Arcs in an Electric Arc Furnace Using a Mathematical Model*. Bulletin of South Ural State University. Series: "Energy". 21, 2 (April 2021), 72–84. <https://doi.org/10.14529/power210208>
12. V.Y. Ushakov, A.V. Mytnikov, I.U. Rakhmonov, (2023). *Traditional Electrical Diagnostic Methods*. Power Systems, 2023, Part F1292, pp. 179–197.
13. I.U. Rakhmonov, F.A. Hoshimov, N.N. Kurbonov, D.A. Jalilova, (2022). *Optimization of the Modes of Electric Loads of Power-consuming Units Operating in Different Production Modes*. AIP Conference Proceedings, 2022, 2552, 050022. <https://doi.org/10.1063/5.0112391>
14. I.U. Rakhmonov, V.Ya. Ushakov, N.N. Niyozov, N.N. Kurbonov, M. Mamutov, (2021). *Energy saving in industry*. E3S Web of Conferences, 2021, 289, 07014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128907014>
15. I. Rakhmonov, A. Berdishev, B. Khusanov, U. Khaliknazarov, U. Utbergenov, (2020). *General characteristics of networks and features of electricity consumers in rural areas*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 883(1), 012104.
16. M.M. Kamolov, Sh.D. Juraev, S.T. Ismoilov, S.A. Abdulkerymov, Kh.B. Nazirov, (2020). *Consideration of non-sinusoidal/asymmetrical operating mode of the power network for public utility services when calculating the zero conductor current level*. Electricity, (2020); 1: 35-43.
17. M.M. Kamolov, Kh.B. Nazirov, S.T. Ismoilov, Sh.D. Juraev, A.S. Amirkhanov, (2019). *Experimental assessment of power quality of modern public utility and office electrical consumers*. Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research, (2019); 2(46): 26-33.
18. M.K. Bobojanov, A.N. Rasulov, S.K. Mahmutkhonov, (2022). *Assessment of voltage non-sinusoidality by consumer power*. Problems of Energy and Resource Saving, (2022); Special Issue (No. 83): pp.177-182.
19. Amarjeet Singh, Ravindra Kumar Singh, Asheesh Kumar Singh, (2017). *Power Quality Issues of Electric Arc Furnace and their Mitigations -A Review*. International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS). Vol-4, Issue-4, Apr- 2017. <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.4.4.4>
20. Andriy Lozynskyy, Jacek Kozyra, and all authors, (2022). *A Mathematical Model of Electrical Arc Furnaces for Analysis of Electrical Mode Parameters and Synthesis of Controlling Influences*. Energies 2022, 15, 1623. <https://doi.org/10.3390/en15051623>

Authors of the publication

Maksud K. Bobojanov – Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9655-2683>. E-mail: mbobojanov@yahoo.com

Rakhmatillo Ch. Karimov – Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0129-5643>. E-mail: raxmatillo82@mail.ru

Oksana S. Popkova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3007-6853>. E-mail: oksiniy@mail.ru

Furkat N. Tuychiev – Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0047-7066>. E-mail:

tuychievfn@gmail.com

Sultonkhuzha K. Makhmutkhanov – Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-4097>. E-mail: sultonmk@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено **28.02.2025 г.**

Отредактировано **12.03.2025 г.**

Принято **04.04.2025 г.**

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 620.424.1

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-2-138-153

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТЭЦ С ПАРОГАЗОВЫМ И ПАРОТУРБИНЫМ ЭНЕРГОБЛОКАМИ ДЛЯ МАКСИМИЗАЦИИ ПРИБЫЛИ НА БАЛАНСИРУЮЩЕМ СЕГМЕНТЕ ОПТОВОГО РЫНКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Елсуков Н.С.¹, Аникина И.Д.¹, Голубев С.Е.²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия

²ОАО «Национальное бюро информатизации», г. Москва, Россия
elsukov.ns@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке методики повышения экономической эффективности теплоэлектроцентралей (далее ТЭЦ) с парогазовым и паротурбинным блоками на балансирующем сегменте оптового рынка электроэнергии и мощности (далее ОРЭМ) с учетом фактических характеристик оборудования. Перераспределение тепловых потоков между энергоблоками ТЭЦ с использованием методов математического моделирования режимов станции позволяет увеличить прибыль как на Рынке на сутки вперед (далее РСВ), так и на Балансирующем рынке электроэнергии (далее БР). ЦЕЛЬ. Повысить маржинальный доход ТЭЦ на БР путем оптимизации режимов. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялся метод имитационного моделирования режимов работы ТЭЦ и метод расчета балансов исследуемой ТЭЦ на стационарных режимах с использованием программных продуктов United Cycle и Microsoft Excel. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье представлены результаты снижения топливных издержек при перераспределении тепловых потоков обратной сетевой воды между паротурбинным и парогазовым энергоблоками путем перераспределения теплофикационных нагрузок между энергоблоками исследуемой ТЭЦ. Был проведен анализ функций дополнительных выработки электроэнергии и топливных издержек, приведенных к денежному потоку, с определением локального экстремума, обеспечивающего максимальную прибыль на БР. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. С помощью перераспределения теплофикационных нагрузок между энергоблоками ТЭЦ было достигнуто снижение суммарного расхода топлива до 7%, обеспечивающее рост прибыли до 60,59 тыс.руб./ч. Поиск оптимального количества увеличения вырабатываемой электроэнергии на БР приводит к росту прибыли до 14,62 и 128,22 тыс.руб./ч для паротурбинного и парогазового блока, соответственно.

Ключевые слова: теплоэлектростанция; продажа электроэнергии; оптимизация режимов; оптовый рынок электроэнергии; балансирующий рынок электроэнергии; экономика энергетики.

Для цитирования: Елсуков Н.С., Аникина И.Д., Голубев С.Е. Оптимизация режимов ТЭЦ с парогазовым и паротурбинным энергоблоками для максимизации прибыли на балансирующем сегменте оптового рынка электроэнергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 138-153. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-138-153.

OPTIMIZATION OF CHPP WITH CCGT AND STEAM TURBINE UNITS MODES FOR PROFIT MAXIMIZATION ON THE WHOLESALE ELECTRICITY MARKET

Elsukov N.S.¹, Anikina I.D.¹, Golubev S.E.²

¹Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

²JSC "National Bureau of Informatization", Moscow, Russia
elsukov.ns@mail.ru

Abstract: RELEVANCE. Optimization of CHPP modes is the most urgent task to increase profits on the wholesale electricity market. Free market economy forces CHPP's to optimize its operation to achieve additional profits on Balancing electricity market. THE PURPOSE is to increase marginal income of CHPP at the Wholesale Electricity Market by modes optimization. METHODS. The method of CHPP simulation modelling and the method of CHPP heat balances calculation were used. The digital twin of the investigated power plant was created in CAE United Cycle. United Cycle also provides the ability to calculate heat and mass balances of the CHPP in stationary modes. Other calculations were carried out by Microsoft Excel. RESULTS. The paper presents the results of fuel costs reduction due to return network water heat flows redistribution between steam turbine and combined cycle gas turbine. This result was achieved by solving the system of balance equations of power units of the investigated CHPP. A profit increase on the market with constant output of electricity and heat was achieved. The functions of additional power generation and fuel costs have been investigated. The cash flow of revenue and expenses was analyzed. The local extremum of the maximum profit on the balancing market was determined. CONCLUSIONS. In a result of heat loads redistribution between steam and combined-cycle gas turbines, a reduction of total fuel consumption up to 7% was achieved. This ensures profit growth up to 60.59 thou.rub./h. The investigation of the optimal amount of power increase at Balancing market leads to profit growth up to 14.62 and 128.22 thou.rub./h for steam and combined cycle gas turbine, respectively.

Keywords: thermal power plants; electricity supply; modes optimization; Wholesale Electricity market; Balancing electricity market; energy economics.

For citation: Elsukov N.S., Anikina I.D., Golubev S.E. Optimization of CHPP with CCGT and steam turbine units modes for profit maximization on the wholesale electricity market. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (2): 138-153. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-138-153.

Введение (Introduction)

Электроэнергия обладает особенностями, влияющими на системную и коммерческую деятельность как электростанций, так и Единой Энергетической Системы (далее ЕЭС) в целом. Ввиду технической сложности хранить электроэнергию в больших количествах, равенства производства и потребления энергии в ЕЭС, отсутствия возможности проследить какой источник снабжает какого потребителя, организация процессов регулирования режимов ЕЭС и купли-продажи электроэнергии с применением рыночных механизмов является нетривиальной задачей.

Позиции тепловых электростанций на ОРЭМ являются затруднительными, поскольку им необходимо конкурировать с атомными и гидравлическими генераторами, чьи операционные издержки, формирующие равновесную цену на рынке, меньше. ТЭЦ с более дорогим предложением рискуют быть не отобранными системным оператором для покрытия кривой потребления электроэнергии. Сложившиеся условия вынуждают ТЭЦ вкладывать средства в своевременное обновление неэффективного оборудования, в развитие современных технологий и в снижение издержек при производстве электроэнергии и теплоты.

Одним из перспективных направлений укрепления позиций ТЭЦ на ОРЭМ является оптимизация режимов с целью максимизации прибыли. Наибольший объем торгов в пределах ценовых зон ЕЭС приходится на РСВ. Объем отпущенной в сеть электроэнергии от ТЭЦ при работе на РСВ обусловлен спросом потребителей и величиной ценовой заявки. Итоговое решение по выдаче в сеть нагрузки принимает системный оператор [1], что накладывает ограничение на увеличение или уменьшение выработки электростанций в прибыльные и убыточные часы работы.

Теплоотпуск от ТЭЦ обусловлен тепловым графиком района теплоснабжения, что также выстраивает четкие границы для возможности регулирования режимов. Важно отметить, что перенос выработки электроэнергии с одной турбины на другую при сохранении суммарного отпуска от ТЭЦ не может являться универсальным оптимизационным методом, поскольку энергоблоки одной ТЭЦ могут относиться к разным группам точек поставок (далее ГТП), и, соответственно, наибольший эффект достигается при перераспределении теплофикационных нагрузок между энергоблоками в разных ГТП. Однако, если в состав ТЭЦ входит два энергоблока и больше, то при неизменном отпуске электроэнергии от ГТП и теплоты (при фиксированной выручке),

предоставляется возможность перераспределить потоки сетевой воды между источниками теплоты ТЭЦ таким образом, чтобы суммарный расход топлива уменьшился, что приведет к снижению топливных издержек и увеличению прибыли.

Объемы торгов на Балансирующем рынке электроэнергии в разы уступают РСВ, однако, цена продажи электроэнергии на БР, как правило, выше. При балансировании системы у участников ОРЭМ при положительном решении системного оператора появляется возможность как увеличить выработку электроэнергии при высокой цене на рынке, так и снизить при ведении убыточного режима, что в итоге оказывает положительное влияние на прибыль.

В данной статье предлагается рассмотреть оптимизацию режимов ТЭЦ с паротурбинным и парогазовым энергоблоками путем переноса части теплофикационной нагрузки с одного энергоблока на второй для снижения операционных издержек и определение такого количества дополнительного увеличения или снижения выработки на БР, при которой будет достигнута максимальная прибыль.

Целью исследования является проведение оптимизации режимов исследуемой ТЭЦ для максимизации прибыли на БР.

Теоретическая значимость заключается в применении математической постановки решаемых задач и использовании современных методов моделирования режимов работы паротурбинной и парогазовой установок (далее ПТУ и ПГУ, соответственно) с помощью цифровой модели исследуемой ТЭЦ с фактическими характеристиками энергетического оборудования для достижения поставленной цели.

Практическая значимость работы состоит в увеличении маржинального дохода генерирующих компаний на ОРЭМ.

Литературный обзор (Literature Review)

Среди существующих методов оптимизации режимов наиболее широко применяется метод равномерного распределения характеристик относительного прироста мощности, подробно описанный в [2]. Представленный метод решает задачу минимизации суммарного расхода топлива на ТЭЦ, что являлось актуальным при плановой экономике. Однако, текущая конъюнктура рынка вынуждает генерирующие компании пересмотреть подход к вопросу оптимизации в направлении максимизации прибыли. Для некоторых режимов задача максимизации прибыли вырождается в поиск минимального суммарного расхода топлива, что делает предложенный метод актуальным. Но стоит отметить, что в условиях рыночных механизмов продажи электроэнергии для некоторых режимов за счет отпуска в сеть большего количества энергии выручка от ее продажи может превысить дополнительные топливные издержки, затрачиваемые на ее производство.

Реалии функционирования ОРЭМ оказывают непосредственное влияние на режимы энергоблоков ЕЭС. В работе ученых Казанского государственного энергетического университета [3] выявляются основные факторы, влияющие на конкурентоспособность участников рынка, а также приводятся преимущества и недостатки действующих рыночных механизмов.

Внедрение программных комплексов оптимизации режимов работы ТЭЦ рассмотрены в исследовании [4]. Авторами был представлен результат экономического расчета от внедрения программно-вычислительного комплекса, позволяющего планировать и вести режимы ТЭЦ.

В работе [5] представлен результат оптимизационных мероприятий по критерию максимизации прибыли паротурбинных блоков ТЭЦ. Предлагаемая методика позволяет на каждом шаге определять приращение компонентов целевой функции для определения наиболее благоприятных выходных параметров.

Возросший спрос на применение цифровых двойников ТЭЦ для решения ряда задач приводит к появлению новых программно-вычислительных комплексов. Например, автором в [6] представлена программа, позволяющая оптимизировать работу ТЭЦ на ОРЭМ. Автором была апробирована методика поиска оптимальной очередности загрузки оборудования по фактическим энергетическим характеристикам, полученным с помощью программно-вычислительного комплекса.

Явление «цифровой трансформации» в энергетике подробно описано в исследовании [7]. Под руководством Головиной был представлен анализ отечественных и зарубежных работ в данной области, были рассмотрены ключевые аспекты, лежащие в подходе «Индустрии 4.0», и предложен новый подход к элементам цифровой трансформации.

Математическое моделирование режимов ТЭЦ играет важную роль не только в

поиске режимов с максимальной прибылью, но и для исследования надежного функционирования ТЭЦ. Учеными из Иркутского национального исследовательского технического университета в исследовании [8] получены функциональные зависимости параметров ряда типового основного оборудования ТЭЦ, что дает возможность предупреждать о потенциально опасных режимах энергоблоков.

Современные цифровые ресурсы позволяют по-новому посмотреть на вопрос анализа спроса на электроэнергию в регионе. В исследовании [9] было получено точное прогнозирование суточных графиков с отклонением 2,26%, позволяющее предопределять выгодные режимы энергоблоков в регионе.

В работе Клера, Максимова, Степанова и др. [10] изучен вопрос оптимизации режимов ТЭЦ с учетом фактического состояния оборудования, а также был разработан и апробирован программно-вычислительный комплекс, позволяющий моделировать оптимизационные мероприятия режимов с учетом реального состояния оборудования ТЭЦ.

Методы повышения эффективности ТЭЦ с применением математического моделирования представлены в исследовании [11]. Авторами рассмотрено влияние перераспределения теплофикационных нагрузок между тепловыми потребителями на снижение суммарного расхода топлива на исследуемой ТЭЦ.

В работе [12] рассматриваются критерии оптимизации режимов ТЭЦ. Автором было проведено сравнение подходов минимизации суммарного расхода топлива и максимизации прибыли в качестве стандартов оптимизации. В исследовании отмечено, что критерий максимизации прибыли лучше соответствует современным тенденциям развития ОРЭМ.

Устойчивое решение задачи оптимизации режимов тепловых станций в промышленности предложено в АО «Национальное бюро информатизации» [13]. С помощью разработанной специалистами АО «НБИ» платформы «EMAS» возможно оптимизировать режимы электростанций исходя из условий максимизации прибыли, отслеживать теплофизические показатели в узлах цифровых двойников, а также решать широкий ряд задач, направленных на улучшения технологических процессов ТЭЦ.

В зарубежных исследованиях вопрос оптимизации режимов ТЭЦ с целью максимизации прибыли не рассмотрен на достаточно широком уровне. Причиной этому могут послужить особенности местных рынков электроэнергии и низкий коэффициент теплофикации зарубежных теплоэлектростанций ввиду относительно теплых зим, что ограничивает возможность перераспределения теплофикационных нагрузок между энергоблоками. В исследовании [14] рассматривается внедрение систем накопления теплоты параллельно с поиском оптимальной производительности исследуемой угольной ТЭЦ. Автор приходит к выводу, что, решая поставленную задачу с применением методов линейного программирования, возможно снизить нагрузку на водогрейные котлы и увеличить количество отпускаемой в сеть электроэнергии, что положительно сказывается на экологической и экономической деятельности ТЭЦ.

В работе [15] авторы рассматривали вопрос оптимизации режимов ТЭЦ в регионе с относительно крупной выработкой электроэнергии с применением возобновляемых источников. В результате исследования была разработана операционная стратегия, позволяющая, обеспечивающая гибкость энергоснабжения потребителей, и было достигнуто более экономичный график работы с увеличением прибыли от реализации электроэнергии.

Отдельное внимание в зарубежных исследованиях уделяется вопросам максимизации прибыли энергообъектов с учетом целей по декарбонизации энергетики. В статье [16] предлагается модель управления энергопотреблением с применением методов двухэтапного стохастического программирования, включающая фотоэлектрические модули, ветряные турбины, системы накопления энергии, ТЭЦ и теплогенерирующие установки. Полученные результаты свидетельствуют об улучшении экономических и экологических показателей при работе энергетических объектов на РСВ.

Анализ вышеуказанных работ показал необходимость проведения дополнительных исследований в области оптимизации режимов ТЭЦ с комбинацией парогазовых и паротурбинных энергоблоков при работе на обоих конкурентных сегментах ОРЭМ. Применение новых методов моделирования цифровых моделей с выводом математических зависимостей имеет высокий потенциал снижения использования энергетических ресурсов на ТЭЦ.

Материалы и методы (Materials and methods)

Ввиду недостаточной освещенности проблемы оптимизации ТЭЦ с парогазовыми и

паротурбинными блоками с целью увеличения прибыли на ОРЭМ, развития отечественного газотурбостроения и высокой доли в ЕЭС РФ паротурбинных блоков, в качестве объекта исследования была выбрана двухблочная ТЭЦ, в состав которой входят паротурбинная установка с паровой турбиной Т-180/210-130 и парогазовый блок с установкой ПГУ-450Т, выполненный по схеме «дубль-блок» с двумя газовыми турбинами типа ГТЭ-160, двумя вертикальными котлами утилизаторами типа Пр-228/47-7,86/0,62-515/230 и паровой турбиной типа Т-125/150-7,4.

Развитие цифровых инструментов решения математических задач позволяет уменьшить трудозатраты при расчетах. Задачу максимизации прибыли ТЭЦ в условиях ОРЭМ удобно решать с помощью системы автоматизированного проектирования (далее САПР) «United Cycle» [17], позволяющую проводить расчеты паротурбинных, газотурбинных и парогазовых установок в стационарных режимах путем сведения тепловых и материальных балансов в узлах созданной модели. Построение цифровой модели происходит в несколько этапов: создание графа исследуемого объекта – электростанции с энергоблоками ПГУ-450 и Т-180 в специальном САПР «United Cycle», параметризация узлов и элементов тепловой схемы по заводским характеристикам с их дальнейшей корректировкой, принимая во внимание фактическое состояние оборудования исследуемой ТЭЦ путем учета показаний с АСУТП и базы данных из системы мониторинга режимов работы и текущего состояния оборудования из информационной системы «Kiberry.Энергобаланс» [18]. С помощью цифровой модели можно смоделировать любой стационарный эксплуатационный режим работы ТЭЦ, что открывает более широкий диапазон для оптимизации по сравнению с применением моделей, основанных на данных из нормативно-технической документации (НТД). В НТД приведены данные для номинального режима работы, а часть правок для учета изменения состояния оборудования, расчетной тепловой схемы и режимов работы может отсутствовать или быть некорректной, поэтому использование моделей, основанных на НТД, имеет ряд ограничений. На рисунке 1 показана часть тепловой схемы модели, включающая в себя парогазовый блок объекта исследования, построенная в САПР «United Cycle».

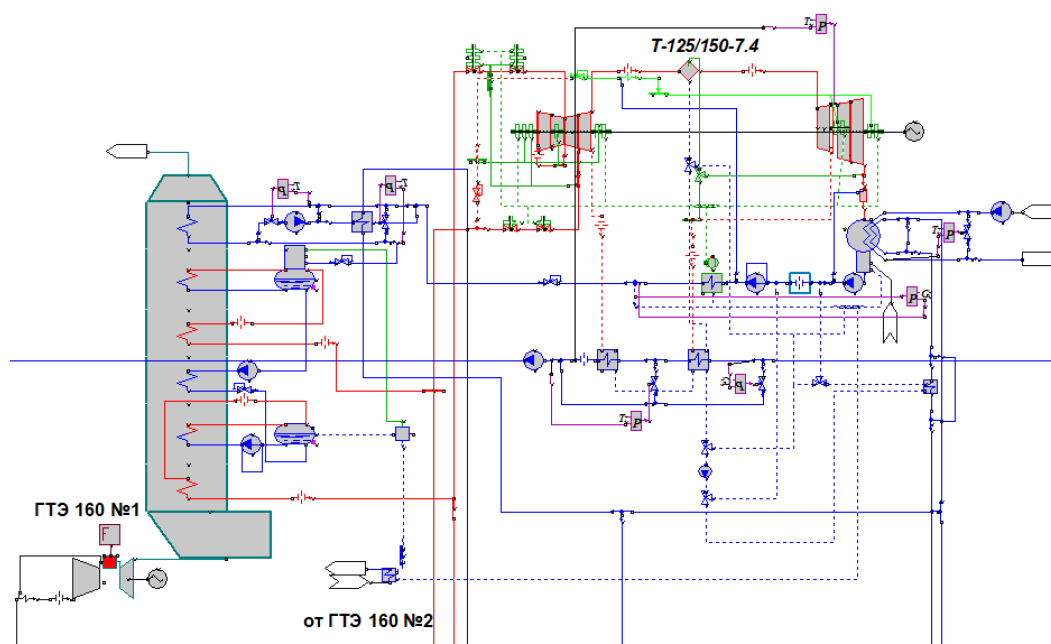


Рис. 1. Расчетная тепловая схема модели парогазового блока исследуемой ТЭЦ Fig. 1. CCGT unit design diagram of investigated CHPP

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

В зависимости от интересующего сегмента ОРЭМ был разработан алгоритм оптимизации режимов работы станции, представленный в виде блок-схемы на рисунке 2, отражающий последовательность действий, необходимых для решения задачи максимизации прибыли ТЭЦ.

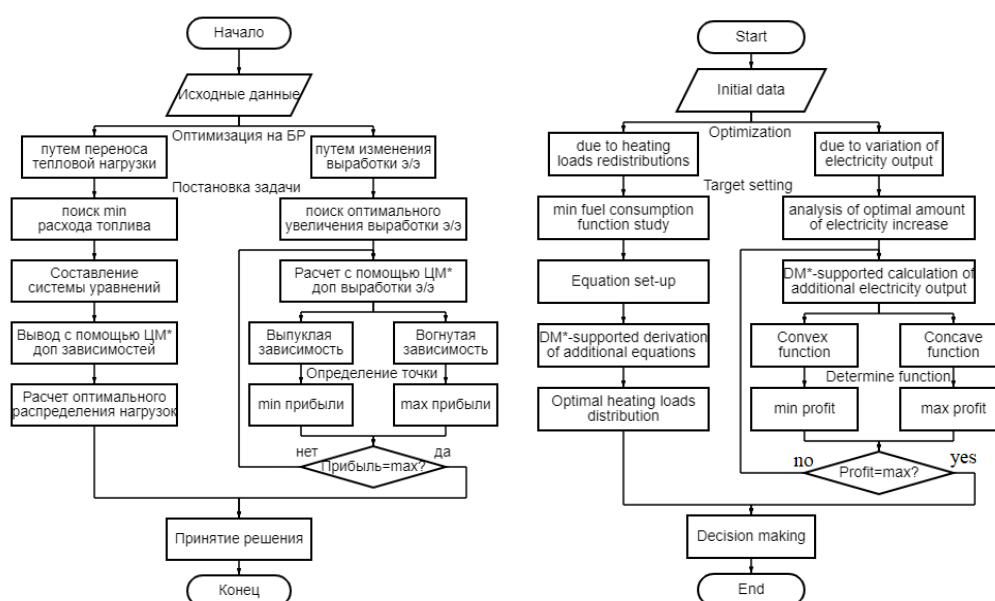


Рис. 2. Блок-схема методологии исследования:

ЦМ – цифровая модель исследуемой ТЭЦ

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

Fig.2. Flowchart of research methods:

DM – digital model of CHPP under investigation

При решении задачи оптимизации режимов ТЭЦ путем перераспределения теплофикационных нагрузок ограничениями выступают отпускаемая в сеть электроэнергия от блоков Т-180 и ПГУ-450Т (N_1 и N_2 , МВт, соответственно) и теплофикационная нагрузка (Q_1 и Q_2 , МВт). ТЭЦ, выполняя свои обязательства при работе на рынке, выдает в сеть одобренное системным и коммерческим операторами количество электроэнергии, что не дает возможности энергоблокам влиять на прибыль путем изменения отпуска. Следует отметить, что максимально эффективным с точки зрения прибыли ТЭЦ является перенос тепловой нагрузки между энергоблоками разных ГТП.

Отпуск теплоты от ТЭЦ напрямую зависит от температурного графика района теплоснабжения, поэтому изменения суммарного теплоотпуска (Q , МВт), а также расхода (G , т/ч) и температуры (τ , °С) прямой сетевой воды с целью оптимизации режимов являются недопустимыми мероприятиями. Технические ограничения отсутствуют со стороны перераспределения теплофикационных нагрузок между энергоблоками. Это означает, что на расходы и температуры сетевой воды на выходе из подогревателей энергоблоков Т-180 и ПГУ-450Т (G_1 , т/ч и G_2 , т/ч, τ_1 , °С и τ_2 , °С, соответственно) накладываются только физические ограничения по максимально допустимым температурам в корпусах подогревателей сетевой воды и расходам сетевой воды при условии достижения требуемых по тепловому графику суммарного расхода (G , т/ч) и температуры (τ , °С) прямой сетевой воды. Дополнительным ограничением для температуры прямой сетевой воды на выходе из ПГУ-450Т является условие поддержания температуры уходящих газов на выходе из котла-утилизатора на уровне 100 °С, поскольку конденсат греющего пара сетевого подогревателя энергоблока направляется в котел-утилизатор ПГУ. Значительное уменьшение температуры уходящих газов может вызвать конденсацию оксидов азота, а ее повышение приведет к уменьшению КПД котла-утилизатора.

С технической точки зрения мероприятия переноса теплофикационной нагрузки с одного блока на другой заключаются в следующем: при увеличении расхода обратной сетевой воды на одном энергоблоке для поддержания нужных параметров прямой сетевой воды прикрывается регулирующая диафрагма, увеличивается теплофикационная нагрузка блока. При неизменном расходе пара рост теплоотпуска может быть обусловлен только уменьшением мощности турбины, что недопустимо. Для этого при закрытии регулирующей диафрагмы нужно увеличить расход пара через турбину, чтобы не допустить недовыработку мощности. Это является следствием увеличения расхода топлива на энергоблоке. Соответственно, при уменьшении расхода сетевой воды через сетевые подогреватели другого блока регулирующая диафрагма приоткрывается и для недопущения выработки избытка электроэнергии расход газа в энергетическом котле или

камере сгорания уменьшается. Оптимизацию можно считать успешной, если уменьшение расхода топлива на одном энергоблоке превысит увеличение на другом при сохранении отпускаемой от ТЭЦ продукции.

С учетом представленных факторов оптимизация режимов ТЭЦ при переносе теплофикационной нагрузки сводится к поиску минимальной функции суммарного расхода на ТЭЦ путем перераспределения теплофикационных нагрузок между энергоблоками. Для решения поставленной задачи необходимо для текущего режима ТЭЦ составить систему уравнений, в которую входят:

1. Массовый расход сетевой воды в узле смешения после сетевых подогревателей энергоблоков;
2. Теплофикационная нагрузка сетевого подогревателя Т-180 со стороны сетевой воды;
3. Теплофикационная нагрузка сетевого подогревателя ПГУ-450Т со стороны сетевой воды;
4. Уравнение в точке смешения сетевой воды на выходе из сетевых подогревателей энергоблоков Т-180 и ПГУ-450Т;
5. Расход условного топлива Т-180 (B_1 , т.у.т./ч), определенный из теплового баланса энергоблока;
6. Расход условного топлива ПГУ-450Т (B_2 , т.у.т./ч), определенный из теплового баланса энергоблока;

Представленные уравнения в последовательном порядке собраны в систему (1):

$$\begin{cases} G = G_1 + G_2, \text{ т/ч} \\ Q_1 = G_1 \cdot c_p \cdot (\tau_1 - \tau'), \text{ МВт} \\ Q_2 = G_2 \cdot c_p \cdot (\tau_2 - \tau'), \text{ МВт} \\ G \cdot \tau = G_1 \cdot \tau_1 + G_2 \cdot \tau_2, \text{ м / ч} \cdot ^\circ\text{C} \\ B_1 = \frac{N_1 + Q_{k1} + Q_{вп1} + Q_1 + Q_{п}}{\eta_{ка} \cdot Q_H^p}, \text{ т.у.т./ч} \\ B_2 = \frac{N_2 + 2 \cdot G_{yx} \cdot h_{yx} + Q_{k2} + Q_{вп2} + Q_2 - 2 \cdot G_B \cdot h_B}{Q_H^p}, \text{ т.у.т./ч} \end{cases} \quad (1)$$

где $c_p = 4,187$ – изобарная теплоемкость воды, кДж/(кг·°C);

τ' – температура обратной сетевой воды на исследуемом режиме, °C;

$Q_{k1, k2}$ – тепловая нагрузка конденсатора на исследуемом режиме энергоблоков Т-180 и ПГУ-450Т, соответственно, МВт;

$Q_{вп1, вп2}$ – тепловая нагрузка встроенного пучка конденсатора Т-180 и ПГУ-450Т на исследуемом режиме, соответственно, МВт;

$Q_{п}$ – тепловая нагрузка промышленного потребителя пара энергоблока Т-180 на исследуемом режиме, МВт;

$\eta_{ка}$ – КПД котлоагрегата энергоблока Т-180 на исследуемом режиме, %;

Q_H^p – теплота сгорания условного топлива, МДж/кг;

G_{yx}, h_{yx} – расход и энтальпия уходящих газов энергоблока ПГУ-450Т на исследуемом режиме, соответственно, т/ч и кДж/кг;

G_B, h_B – расход и энтальпия воздуха на входе в компрессор энергоблока ПГУ-450Т на исследуемом режиме, соответственно, т/ч и кДж/кг.

В систему уравнений (1) входят 6 уравнений и 10 неизвестных величин ($G_1, G_2, Q_1, Q_2, \tau_1, \tau_2, B_1, B_2, Q_{k1}, Q_{k2}$). Остальные величины являются либо постоянными, либо изменение их значений на оптимизируемом диапазоне относительно невелико. Для ее решения необходимо добавить 4 дополнительных уравнения. Для этого в САПР «United Cycle» на исследуемом режиме при неизменном отпуске электроэнергии и постоянной нагрузке теплофикационного пучка для обоих энергоблоков смоделируем зависимость потерь в конденсаторе от теплофикационной нагрузки в допустимом регулируемом диапазоне. На рисунках 3 и 4 представлены зависимости теплоотпуска от блоков Т-180 и ПГУ-450Т от нагрузки конденсатора:

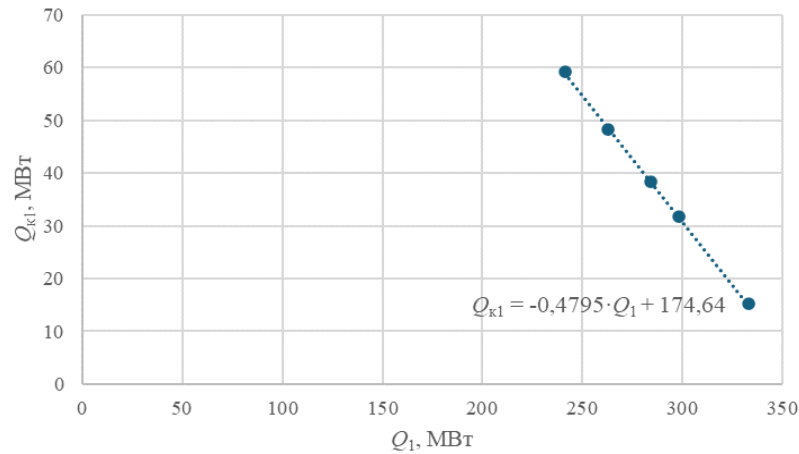


Рис. 3. Зависимость теплоотпуска от потерь в конденсаторе на энергоблоке Т-180 Fig. 3. Function of heat release on losses in the condenser at power unit T-180

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

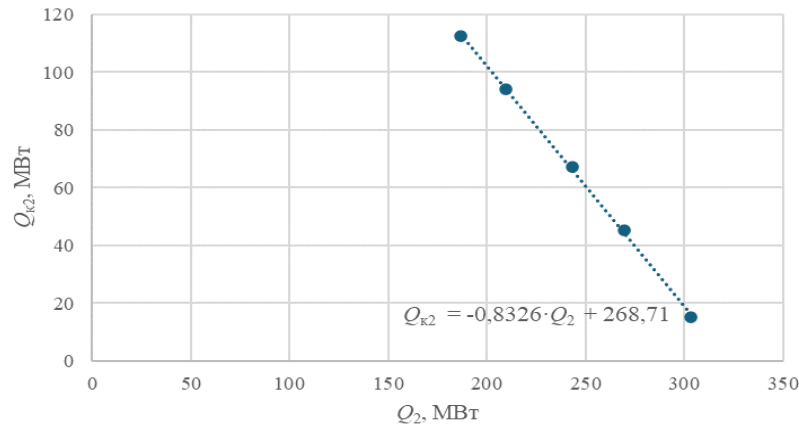


Рис. 4. Зависимость теплоотпуска от потерь в конденсаторе на энергоблоке ПГУ-450Т Fig. 4. Function of heat release on losses in the condenser at power unit CCGT-450

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

Для замыкания системы (1) также необходимо добавить еще два уравнения. Для этого из балансовых уравнений расходов топлива энергоблоков Т-180 и ПГУ-450Т выразим расходы топлива и возьмем частную производную функции по расходу сетевой воды через энергоблок. В точке минимального расхода функции частная производная будет равняться нулю:

$$\frac{\partial B_{1,2}}{\partial G_{1,2}} = 0 \quad (2)$$

Далее остается решить систему уравнений (1) относительно суммарного расхода топлива на ТЭЦ (B_1+B_2 , т.т./ч) и сравнить с расходом до оптимизационных мероприятий.

Постановка задачи максимизации прибыли в условиях балансирующего рынка при изменении выработки отличается от ранее описанной. Ввиду невозможности абсолютно точного прогнозирования спроса на электроэнергию ее выработка на электростанциях в рамках каждого часа несения нагрузки может изменяться в зависимости от неплановых событий и команд системного оператора. В зависимости от сложившейся цены на БР и текущего режима энергоблока выручка за счет продажи дополнительно выработанной электроэнергии может быть как больше, так и меньше дополнительных затрат на топливо, обуславливающих рост выработки. Поэтому с коммерческой точки зрения возникает интерес поиска оптимального количества дополнительно выработанной электроэнергии, обеспечивающий максимальную прибыль на БР. Критерий максимизации прибыли ТЭЦ при работе на БР отражен в формуле (3):

$$\text{ИБР} \cdot \Delta N_{\text{э}} - \Pi_{\text{топ}} \cdot \Delta G_{\text{топ}}, \text{ руб./ч} \rightarrow \max, \quad (3)$$

где ИБР – индикатор балансирующего рынка, тыс.руб./МВт;

ΔN_3 – увеличение выработки электроэнергии энергоблока при работе на БР, МВт;

$C_{\text{топ}}$ – цена топлива [19], тыс.руб./(ту.т./ч);

$\Delta G_{\text{топ}}$ – увеличение расхода топлива, обуславливающее рост выработки, ту.т./ч.

Поставленную задачу удобно решать методом прямого численного моделирования стационарных режимов ТЭЦ в САПР «United Cycle». Поэтому для отдельно взятого режима с определенным шагом смоделируем увеличение выработки электроэнергии на каждом энергоблоке при постепенном открытии регулирующей диафрагмы для поддержания текущих теплофикационных нагрузок.

Для наглядного представления выводимых зависимостей результат моделирования увеличения выручки представим в осях «Денежный поток, тыс.руб./ч – Электрическая нагрузка, МВт», в которой линия выручки за продажу электроэнергии вырождается в прямую, а кривая топливных издержек в полином 2-й степени. На рисунках 5 и 6 представлена зависимость выручки от продажи электроэнергии на БР и топливных издержек от электрической нагрузки энергоблока для двух разных режимов ПГУ-450Т, соответственно:

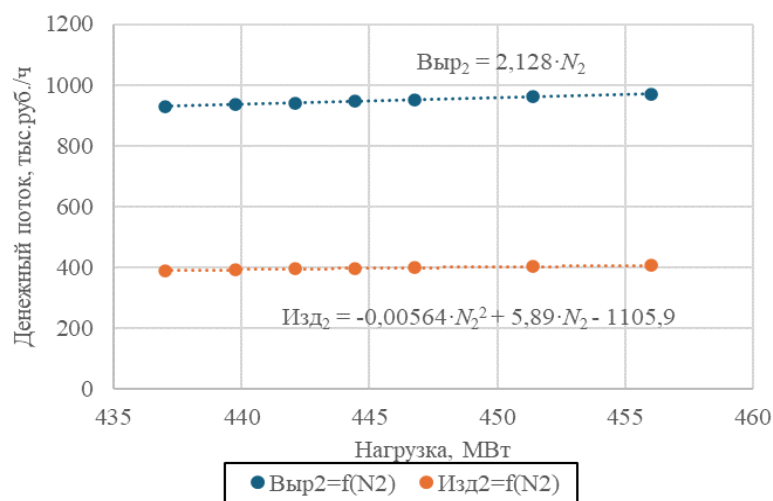


Рис. 5. Зависимость выручки с продажи электроэнергии на БР от топливных издержек на Balancing Market on fuel costs at mode No.6 (see Table 2) for CCGT-450T

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

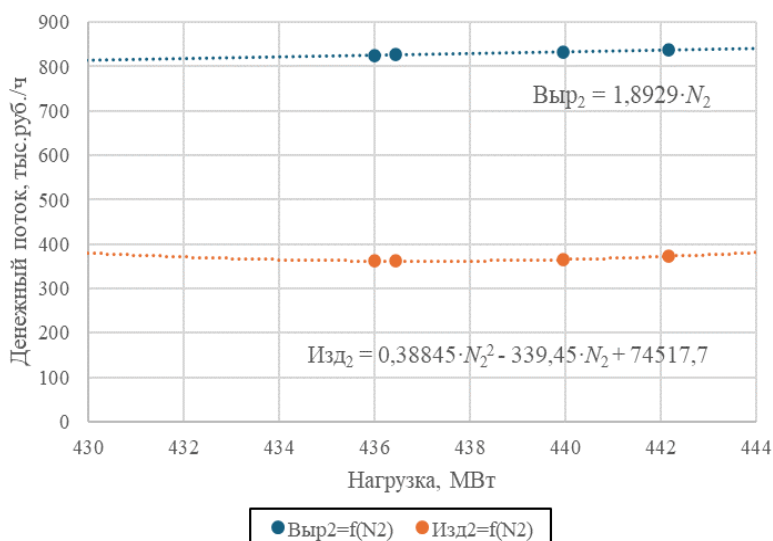


Рис. 6. Зависимость выручки с продажи электроэнергии на БР от топливных издержек на Balancing Market on fuel costs at mode No.2 (see Table 2) for CCGT-450T

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

На исследуемых режимах для энергоблока ПГУ-450Т кривая топливных издержек выродилась в вогнутый и выпнутый полином, рисунки 5 и 6 соответственно. Это значит, что касательная, параллельная прямой выручки, к функции издержек будет проходить в точке минимума и максимума прибыли, соответственно. Данная точка является индикатором для потенциально прибыльного режима. При виде функции издержек, имеющих вид выпуклого полинома 2-й степени (рис. 5), полученная точка минимума прибыли будет индикатором наименее выгодного режима, и чем дальше от нее будет проходить режим, тем он будет выгоднее. Точка максимума прибыли при вогнутом виде функции издержек однозначно определяет режим с наибольшей прибылью.

Точка минимума прибыли для режима, представленном на рисунке 5:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial N_2} \text{Изд}_2 &= \frac{\partial}{\partial N_2} \text{Выр}_2 \\ \frac{\partial}{\partial N_2} (-0,00564 \cdot N_2^2 + 5,89 \cdot N_2 - 1105,9) &= \frac{\partial}{\partial N_2} 2,128 \cdot N_2 \\ -0,01128 \cdot N_2 + 5,89 &= 2,128 \\ N_2 &= 333,5 \text{ МВт}\end{aligned}$$

Изобразим на рисунке 5 точку минимума прибыли:

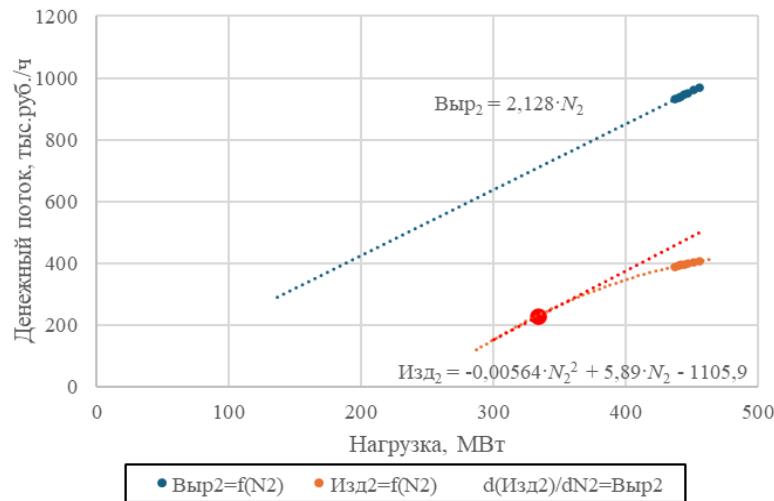


Рис. 7. Экстраполированная зависимость выручки с продажи электроэнергии на БР от топливных издержек с точкой минимальной прибыли на режиме №6 (см. табл. 2 и рис. 5) для ПГУ-450Т

Fig. 7. Extrapolated function of revenue from electricity sales at the Balancing Market on fuel costs with the point of minimum profit at mode No.6 (see Table 2 and Fig. 5) for CCGT-450

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

По аналогии определим экстремум функции топливных издержек для режима, представленном на рисунке 6:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial N_2} \text{Изд}_2 &= \frac{\partial}{\partial N_2} \text{Выр}_2 \\ \frac{\partial}{\partial N_2} (0,3885 \cdot N_2^2 + 339,45 \cdot N_2 + 74517,74) &= \frac{\partial}{\partial N_2} 1,8929 \cdot N_2 \\ 0,777 \cdot N_2 + 339,45 &= 1,8929 \\ N_2 &= 439,3 \text{ МВт}\end{aligned}$$

Полученный экстремум будет являться точкой максимума прибыли, поскольку на исследуемом режиме кривая топливных издержек имеет вид вогнутого полинома 2-й степени:

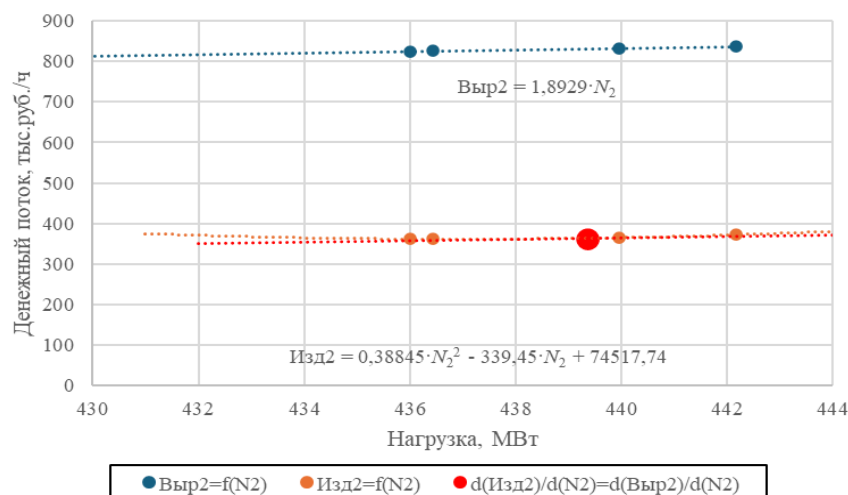


Рис. 8. Зависимость выручки с продажи электроэнергии на БР от топливных издержек с точкой максимальной прибыли на режиме №2 (см. табл. 2 и рис. 6) для ПГУ-450Т

Fig. 8. Function of revenue from electricity sales at the Balancing Market on fuel costs with the point of maximum profit at mode No.2 (see Table 2 and Fig. 6) for CCGT-450

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

Результаты (Results)

Увеличение прибыли ТЭЦ путем ввиду перераспределения тепловых нагрузок между энергоблоками обусловлено уменьшением топливных издержек при постоянной выручке за счет реализации электроэнергии:

$$\Delta \text{Пр} = \text{Пр}_\text{О} - \text{Пр}_\text{И} = (\text{Выр} - \text{Изд}_\text{О}) - (\text{Выр} - \text{Изд}_\text{И}) = \text{Изд}_\text{И} - \text{Изд}_\text{О}, \text{ тыс.руб./ч}, \quad (4)$$

где Пр – прибыль, тыс.руб./ч;

Выр – выручка, тыс.руб./ч;

Изд – издержки тыс.руб./ч;

индекс «о» – оптимизированный режим;

индекс «и» – исходный режим.

Технические и экономические показатели энергоблоков Т-180 и ПГУ-450Т представлены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Результат оптимизационных мероприятий при переносе тепловой нагрузки между блоками

Result of optimization measures in case of heating loads redistribution

Режим	N_1 , МВт	N_2 , МВт	Q_1 , МВт	Q_2 , МВт	G_1 , тыс.нм ³ /ч	G_2 , тыс.нм ³ /ч	$G_{\text{сум}}$, тыс.нм ³ /ч	$\Delta \text{Пр}$, тыс.руб./ч
1 (и)	165	416	298,82	265,16	60,2	96,4	156,6	8,67
1 (о)			266,45	297,90	57,37	97,65	155,02	
2 (и)	178	436	244,67	245,79	60,8	99,6	160,4	19,26
2 (о)			174,90	315,56	56,49	100,41	156,90	
3 (и)	162	422	264,26	208,30	56,9	94,1	151	15,30
3 (о)			196,20	276,36	52,30	95,92	148,22	
4 (и)	164	437	305,38	289,29	60,3	104	164,3	3,04
4 (о)			301,90	292,77	59,14	104,61	163,75	
5 (и)*	164	343,9	337,89	258,91	59,6	85,3	156,4	60,59
5 (о)			331,65	276,65	60,53	84,85	145,38	
6 (и)	165	437	288,70	214,68	58,2	98,3	156,5	18,46
6 (о)			193,74	309,64	53,26	99,88	153,14	
7 (и)	165	342,6	290,13	222,93	59,1	82,5	141,6	7,36
7 (о)			241,98	271,08	56,18	84,08	140,26	

в суммарном расходе топлива на режиме 5(и) учтен пиковый водогрейный котел

the total fuel consumption on Mode No.5 includes the peak water boiler's fuel consumption

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

Прибыль ТЭЦ при балансировании энергосистемы в результате оптимизации режимов определяется по формуле:

$$\text{Пр}_i^j = \Delta \text{Выр}_i^j - \Delta \text{Изд}_i^j = (\text{Выр}_i^j - \text{Выр}_i^{j=1}) - (\text{Изд}_i^j - \text{Изд}_i^{j=1}), \text{ тыс.руб./ч}, \quad (5)$$

где $i = [1, 2]$ – блоку Т-180 соответствует индекс «1», блоку ПГУ-450Т соответствует индекс «2»;

j – номер расчета;

$j = 1$ – показатель относится к номинальному режиму.

Результат оптимизационных мероприятий при работе на БР энергоблоков Т-180 и ПГУ-450Т представлен в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Результат оптимизационных мероприятий при работе ТЭЦ на БР
Result of optimization measures in case of CHPP operation on Balancing Market

Режим	N ₁ , МВт	N ₂ , МВт	ΔВыр ₁ , тыс.руб./ч	ΔВыр ₂ , тыс.руб./ч	ΔИзд ₁ , тыс.руб./ч	ΔИзд ₂ , тыс.руб./ч	ΔПр ₁ , тыс.руб./ч	ΔПр ₂ , тыс.руб./ч
1 (и)	165	416	24,72	64,57	22,92	34,24	1,81	30,33
1 (о)	180	455,2						
2 (и)	178	436	7,57	7,48	5,89	3,45	1,68	4,02
2 (о)	182	439,9						
3	162	422	Предлагаемые оптимизационные мероприятия не привели к увеличению прибыли					
4 (и)	164	437	20,23	14,87	5,60	9,43	14,63	5,44
4 (о)	180	448,8						
5 (и)	164	343,9	30,71	222,10	25,10	107,31	5,61	114,80
5 (о)	180	459,6						
6 (и)	165	437	14,90	41,86	10,93	16,52	3,96	25,34
6 (о)	172	456,7						
7 (и)	165	342,6	31,34	232,98	22,79	104,76	8,55	128,22
7 (о)	180	454,1						

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

Обсуждение (Discussions)

По результатам выполнения работы апробированная методика, представленная на рисунке 2, показала свою применимость к решению задач оптимизации ТЭЦ на ОРЭМ с целью максимизации прибыли. Однако стоит отметить факторы, которые могут повлиять на технико-экономические показатели ТЭЦ в случае использования предлагаемой методики на реальном объекте.

Методика увеличения прибыли при работе ТЭЦ путем переноса теплофикационных нагрузок между блоками физически осуществима на режимах со средне-зимней тепловой нагрузкой, поскольку регулирование расхода пара на сетевые подогреватели возможно только с помощью закрытия регулирующей диафрагмы на ПТУ одного блока единомоментно с открытием на другом. При несении максимально-зимних нагрузок регулирующие диафрагмы ПТУ, как правило, полностью закрыты, что лишает возможности применения предлагаемого метода.

Анализируя данные за отопительный период 2023/24 для г. Санкт-Петербург, значительная часть отопительного периода пришлась на режим со средне-зимними отопительными нагрузками. Поэтому, решая систему уравнений (1) для указанных выше режимов, перенос части теплофикационной нагрузки с блока на блок в нужном направлении позволяет уменьшить суммарный расход топлива на ТЭЦ при неизменном количестве отпускаемой продукции. На рисунке 9 изображено относительное снижение суммарного расхода топлива в результате оптимизации режима №1 (см. табл. 1) при постепенном переносе доли теплофикационной нагрузки с сетевых подогревателей энергоблока Т-180 на ПГУ-450Т:

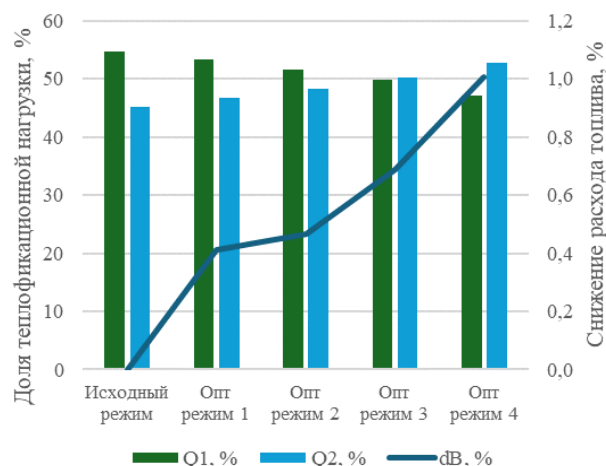


Рис. 9. Зависимость сокращения расхода топлива от переноса теплофикационной нагрузки на режиме №1 (см. табл. 1)

Fig. 9. Function of Fuel Consumption Reduction on CHPP due to Heat Load Transfer at Mode No.1 (see Table 1)

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

Также стоит отметить, что в исследуемом отопительном периоде встречались режимы со средне-зимними нагрузками, в которых для нагрева обратной сетевой воды был включен пиковый водогрейный котел на малую мощность. Замещение нагрузки котла путем большего закрытия регулирующих диафрагм привело к максимальному увеличению прибыли (см. режим №5 табл. 1).

При замыкании системы уравнений (1) была получена зависимость потерь в конденсаторе от теплофикационной нагрузки при постоянном отпуске электроэнергии для энергоблоков Т-180 и ПГУ-450Т (см. рис. 3 и 4). Данные, полученные с помощью цифровой модели, при аппроксимации полиномом 2-й степени имеют меньшее среднеквадратичное отклонение, чем при линейной аппроксимации, как было выполнено в работе. Данное допущение привело к снижению точности промежуточного расчета, однако полученное отклонение при аппроксимировании данных представленными функциями лежит в пределах 1,5%, что ложится на погрешность АСУТП ТЭЦ.

Методика максимизации прибыли ТЭЦ на БР путем изменения выработки электроэнергии возможна при любой теплофикационной нагрузке, но при наличии физической возможности турбин увеличить или уменьшить отпуск электроэнергии в сеть. Представленная в исследовании верхняя граница денежного потока прибыли ТЭЦ на БР определена из учета полного спроса на отпускаемую электроэнергию от исследуемого объекта и положительном решении системного оператора об увеличении выработки станции.

При расчете режима на БР в качестве оптимизируемого параметра был выбран отпуск электроэнергии в сеть, а именно разность между выработанной электроэнергией и затратами на собственные нужды блока. При построении кривых издержек следовало учесть, что с увеличением выработки растут и собственные нужды, которые с одной стороны обуславливают увеличение выработки, но с другой, являются потенциально весомой дополнительной финансовой нагрузкой. Данная корректировка приведет к смещению точек максимума и минимума прибыли не более чем на относительные затраты электроэнергии на собственные нужды (%), что для исследуемых блоков составляет до 5%. Учет описанного фактора позволит повысить точность расчета и является наиболее актуальным заданием для проведения последующих исследований в данном направлении.

Для 3-го режима (см. табл. 2) увеличение расхода топлива в камере сгорания или энергетическом котле вызывали рост температуры прямой сетевой, что нарушило бы обязательства ТЭЦ при работе по тепловому графику, вследствие этого данный режим был признан не подходящим для оптимизационных мероприятий на БР. Открытие регулирующей диафрагмы не обеспечивало нужного давления в сетевом подогревателе. На данном режиме можно было проанализировать оптимизацию на БР каждого блока по-отдельности, при этом для поддержания нужной температуры сетевой воды, параллельно перераспределяя расходы сетевой воды между блоками. В работе описанные действия не рассматривались, поскольку целью исследования была апробация предложенной методики (см. рис. 2). В дальнейшем высокий исследовательский интерес имеет

усложнение алгоритма расчета для оптимизации режимов обоих блоков на БР с переносом теплофикационной нагрузки между ними. Представленные мероприятия могут положительно сказаться на прибыли ТЭЦ.

Заключение (Conclusions)

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение цифровых моделей для решения задач оптимизации режимов ТЭЦ с парогазовыми и паротурбинными блоками имеет высокий исследовательский интерес, поскольку с применением методов математического моделирования возможно получить необходимые физические зависимости без больших затрат материальных ресурсов, тем самым увеличив конкурентоспособность ТЭЦ на ОРЭМ. Новизна исследования заключается в разработке методики повышения маржинального дохода ТЭЦ на БР, учитывающую как перенос теплофикационной нагрузки, так и изменение отпуска электроэнергии;

2. Представленные результаты показали, что предложенная методика оптимизации режимов ТЭЦ на ОРЭМ (см. рис. 2) с целью максимизации прибыли работоспособна. Однако стоит учесть, что алгоритм может быть улучшен путем добавления автоматизированных методов расчета системы уравнения (1), внесения учета ИБР при определении издержек на собственные нужды и построения графиков денежного потока (см. рис. 5 и 6). Автоматизация расчетов позволит в короткие сроки определять наиболее прибыльные режимы, что увеличит адаптивность оптимизируемой ТЭЦ к быстро меняющимся условиям ОРЭМ;

3. В работе задача максимизации прибыли путем переноса части тепловых нагрузок между блоками сводятся к задаче минимизации топливных издержек. В результате была составлена система уравнений (1), позволяющая оценить оптимальное распределение теплофикационных нагрузок между энергоблоками. С учетом распределения теплоотпуска и замещения нагрузок ПВК было получено снижение суммарного расхода топлива на ТЭЦ до 7% (на 11,02 тыс.нм³/ч) (см. табл. 1). За счет этого возможно достижение дополнительной прибыли ТЭЦ до 60,59 тыс.руб./ч;

4. В результате изучения методов максимизации прибыли ТЭЦ в условиях БР, был сделан вывод, что оптимальным является метод численного моделирования режимов энергоблоков с целью поиска максимальной разницы между дополнительной выручкой за продажу электроэнергии на БР и дополнительными издержками, затрачиваемыми на топливо. Для энергоблока Т-180 на исследуемых режимах (см. табл. 2), было достигнуто увеличение прибыли от 1,68 до 14,63 тыс.руб./ч, для ПГУ-450Т от 4,02 до 128,22 тыс.руб./ч.

Литература

1. Технологическое обеспечение работы Оптового Рынка Электроэнергии и Мощности. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.so-ups.ru/functioning/markets/>
2. Литвак, В.В. Оптимизация режимов работы турбоустановок тепловых электрических станций с использованием характеристик относительных приростов // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т.314. №4 –.
3. Бахтеева Н.З., Галимзянов Л.А., Шацких З.В. Конкурентный оптовый рынок электроэнергии и мощности: состояние и новые вызовы. *Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики*. 2016;(5-6):70-78. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-5-6-70-78>
4. Низамов Л.В., Чичирова Н.Д. Программный комплекс оптимизации режимов работы теплоэлектроцентрали. *Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики*. 2016;(1-2):64-74. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-1-2-64-74>
5. Чичирова Н.Д., Низамов Л.А. Оптимизация режимов работы теплоэлектроцентрали, характеризуемой целевой функцией с нелинейными ограничениями. *Надежность и безопасность энергетики*. 2016;(1):35-40.
6. Аникина И.Д. Программа для оптимизации режимов работы ТЭЦ на основе цифровых двойников // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №RU 2023666007; Россия, 10.07.2023.
7. Головина Е.Ю., Самаркина Е.В., Буйнов Н.Е., Евлоева М.В. Цифровизация и цифровая трансформация теплоэнергетики как фактор повышения эффективности тепловой инфраструктуры (обзор). *Теплоэнергетика*, 2022, № 6, с. 3–16.
8. Крупенёв Д.С., Пискунова В.М., Гальфингер А.Г. Моделирование тепловых электростанций при исследовании надёжности энергоснабжения и энергетической безопасности. *Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики*. 2023;25(2):12-25. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-2-12-25>

9. Русина А.Г., Тувшин О., Матренин П.В. Прогнозирование суточного графика электропотребления рабочих дней с учетом метеофакторов для центральной энергосистемы Монголии. *Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики*. 2022;24(2):98-107. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-97-106>

10. Клер А.М., Максимов А.С., Степанова Е.Л., Жарков П.В. и др. Оптимизация режимов работы ТЭЦ с учетом реального состояния основного оборудования. *Теплоэнергетика*, 2009, т. 56, №6, с.50–54.

11. Шириев М.Д., Аквелиев Е.С. Возможности увеличения эффективности ТЭЦ за счёт оптимизации режимов работы. *Современные мировые научные достижения в контексте глобальных вызовов. Серия: естественные и технические исследования*, 2024, с. 214–217.

12. Батухтин А.Г. Выбор критерия оптимизации режимов работы ТЭЦ в условиях Оптового Рынка Электроэнергии и Мощности. *Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов*, Чита, 28–30 ноября 2019 года, с. 131–134.

13. АО «Национальное Бюро Информатизации»: Оптимизация режимов работы ТЭС, ТЭЦ, ПГУ, ГТУ - создание цифровых двойников. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nbiservice.ru/energy/sozdanie-cifrovih-dvoinikov/?ysclid=m2jccwjy55573291222>

14. Pablo Benalcazar, Optimal sizing of thermal energy storage systems for CHP plants considering specific investment costs: A case study, *Energy*, Volume 234, 2021, 121323, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121323>

15. Jiawei Wang, Shi You, Yi Zong, Chresten Træholt, Zhao Yang Dong, You Zhou, Flexibility of combined heat and power plants: A review of technologies and operation strategies, *Applied Energy*, Volume 252, 2019, 113445, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113445>

16. Shahrzad Hadayeghparsat, Alireza SoltaniNejad Farsangi, Heidarali Shayanfar, Day-ahead stochastic multi-objective economic/emission operational scheduling of a large scale virtual power plant, *Energy*, Volume 172, 2019, Pages 630-646, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.143>

17. “United Cycle” Software for simulation of Flow Sheets of Power Plants/ S. Romanov, A. Kutakhov, N. Zhuk, O. Demidov, K. Romanov// ECOS-2003, Kopenhagen PP. 1691-1696 (2003).

18. Программное обеспечение «Kiberry.Энергобаланс» от компании «NEMO Neural Modeling». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nemosoft.ru/energobalance>

19. Приказ ФАС № 910/23 от 28.11.2023 (для исключяющей группы) для г. Санкт-Петербург [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.peterburgregiongaz.ru/org/gas-prices/>

Авторы публикации

Елсуков Никита Сергеевич – аспирант высшей школы атомной и тепловой энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0001-6061-9070>. E-mail: elsukov.ns@mail.ru

Аникина Ирина Дмитриевна – канд. техн. наук, доцент высшей школы атомной и тепловой энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-7885-9814>. E-mail: ia.88@mail.ru

Голубев Сергей Евгеньевич – главный специалист ОАО «Национальное бюро информатизации», г. Москва, Россия. E-mail: serggol764@gmail.com

References

1. Technological support of the Wholesale Electricity Market operation. Available online: <https://www.so-ups.ru/functioning/markets/>

2. Litvak, V.V. Optimisation of operation modes of turbine units of thermal power plants using characteristics of relative gains // *Izvestiya Tomskogo Polytechnicheskogo Universiteta*. 2009. T.314. №4 –.

3. Bakhteeva N.Z., Galimzyanov L.A., Shatskikh Z.V. Competitive wholesale market of the electric power and power: state and new calls. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016;(5-6):70-78. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-5-6-70-78>

4. Nizamov L.A., Chichirova N.D. Software package for optimization of modes of thermal power plant. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016;(1-2):64-74. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-1-2-64-74>

5. Chichirova N.D., Nizamov L.A. Optimisation of operation modes of a combined heat and power plant characterised by a target function with nonlinear constraints. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*. 2016;(1):35-40.

6. Anikina I.D. Programme for optimisation of CHPP operation modes based on digital twins //

Certificate of state registration of the computer program №RU 2023666007; Russia, 10.07.2023.

7. Golovina E.Yu., Samarkina E.V., Buinov N.E., Evloeva M.V. Digitalization and Digital Transformation of the Thermal-Power Industry as a Factor of Improving the Thermal Infrastructure Efficiency (Review). *Thermal Engineering*, 2022, № 6, p. 3–16.

8. Krupenev D.S., Piskunova V.M., Galfinger A.G. Modeling of thermal power plants in the study of reliability of power supply and energy security. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(2):12-25. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-2-12-25>

9. Rusina A.G., Tuvshin O., Matrenin P.V. Forecasting the daily energy load schedule of working days using meteofactors for the central power system of Mongolia. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(2):98-107. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-97-106>

10. Kler A.M., Maksimov A.S., Stepanova E.L., Zharkov P.V., and others. Optimizing the operating modes of cogeneration stations taking actual state of main equipment into account. *Thermal Engineering*. 2009. T. 56. № 6. p. 50-54.

11. Shiriev M.D., Akveliev E.S. The possibilities of increasing the efficiency of a CHPP by optimizing operating modes. *Sovremennye mirovye nauchnye dostizheniya v kontekste global'nyh vyzovov. Seriya: estestvennye i tekhnicheskie issledovaniya*, 2024, p. 214–217.

12. Batukhtin A.G. Selection of criteria for optimization of TPP operation modes under the Wholesale Electricity Market conditions. *Kulaginskie chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennyh processov*, Chita, 28–30 November 2019, p. 131–134.

13. JSC National Bureau of Informatisation: Optimisation: Optimisation of TPP, CHPP, CCGT, GTU operation modes - creation of digital twins. Available online: <https://nbiservice.ru/energy/sozдание-cifrovih-dvoinikov/?ysclid=m2jccwjy55573291222>

14. Pablo Benalcazar, Optimal sizing of thermal energy storage systems for CHP plants considering specific investment costs: A case study, *Energy*, Volume 234, 2021, 121323, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121323>

15. Jiawei Wang, Shi You, Yi Zong, Chresten Træholt, Zhao Yang Dong, You Zhou, Flexibility of combined heat and power plants: A review of technologies and operation strategies, *Applied Energy*, Volume 252, 2019, 113445, ISSN 0360-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113445>

16. Shahrzad Hadayeghparsast, Alireza SoltaniNejad Farsangi, Heidarali Shayanfar, Day-ahead stochastic multi-objective economic/emission operational scheduling of a large scale virtual power plant, *Energy*, Volume 172, 2019, Pages 630-646, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.143>

17. “United Cycle” Software for simulation of Flow Sheets of Power Plants/ S. Romanov, A. Kutakhov, N. Zhuk, O. Demidov, K. Romanov// ECOS-2003, Kopengagen PP. 1691-1696 (2003).

18. Software «Kiberry.Энергобаланс» provided by «NEMO Neural Modeling». Available online: <https://nemosoft.ru/energobalance>

19. FAS Order No. 910/23 of 28.11.2023 (for the excluded group) for the city of St. Petersburg. Available online: <https://www.peterburgregiongaz.ru/org/gas-prices/>

Authors of the publication

Nikita S. Elsukov – Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0001-6061-9070>. E-mail: elsukov.ns@mail.ru

Irina D. Anikina – Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-7885-9814>. E-mail: ia.88@mail.ru

Sergey E. Golubev – JSC “National Bureau of Informatisation”, Moscow, Russia E-mail: serggol764@gmail.com

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено 28.10.2025 г.

Отредактировано 31.01.2025 г.

Принято 05.02.2025 г.



ИННОВАЦИОННАЯ ТОПЛИВОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОНОМИИ РАСХОДА ТОПЛИВА НА ЭНЕРГОПРЕДПРИЯТИЯХ

Низамова А.Ш., Шагиева Г.К.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

nizamova_tes@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Во всех странах мира, в том числе и в России, на энергетических предприятиях непосредственно связанных с производством электрической и тепловой энергии, а также промышленных предприятиях, выпускающих различные средства производства стоит серьезная проблема экономии топлива. На тепловых электрических станциях (ТЭС) удельный расход условного топлива является важнейшим показателем эффективности работы предприятия. От этого показателя зависит цена (тариф) на потребляемую электрическую и тепловую энергию, т.е. в конечном итоге благосостояние населения. *ЦЕЛЬ.* Изложить инновационную концепцию технологии XPlate™ и представить итоги применения технологии Xplate, обеспечивающую экономию расхода топлива. *МЕТОДЫ.* Инновационная НАНО-технология топливо-сбережения. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описана актуальность темы, представлены результаты внедрения технологии XPlate на предприятиях мира и России. *ВЫВОДЫ.* При применении метода XPlate технологии на конкретных предприятиях происходит более полное сгорание топлива, в течении короткого времени увеличивается температура теплоносителя, снижается удельный расход топлива, резко снижается загрязнение поверхностей нагрева котла.

Ключевые слова: технологии XPlate™; дутьевой вентилятор; энергопредприятие; промышленные предприятия.

Благодарности: Статья выполнена по результатам работ Общества с ограниченной ответственностью «КВАНТУМ ЭНЕРДЖИ» и личной просьбе Генерального директора Васильева Андрея Викторовича.

Для цитирования: Низамова А.Ш., Шагиева Г.К. Инновационная топливосберегающая технология для обеспечения экономии расхода топлива на энергопредприятиях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 154-163. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-154-163.

INNOVATIVE FUEL-SAVING TECHNOLOGY TO ENSURE FUEL CONSUMPTION SAVINGS AT ENERGY ENTERPRISES

Nizamova A.Sh., Shagieva G.K.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

nizamova_tes@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* In all countries of the world, including Russia, there is a serious problem of fuel economy at energy enterprises directly related to the production of electric and thermal energy, as well as industrial enterprises producing various means of production. At thermal power plants (TPP), the specific consumption of conventional fuel is the most important indicator of the efficiency of the enterprise. The price (tariff) for consumed electric and thermal energy depends on this indicator, i.e., ultimately, the welfare of the population. *purpose.* *PURPOSE.* To present the innovative concept of XPlate technology and present the results of the application of Xplate technology, which provides fuel economy. *METHODS.* Innovative NANO-technology fuel-saving results. The article describes the relevance of the topic, presents the results of the introduction of XPlate technology at Russian enterprises. *RESULTS.* The article describes the relevance of the

topic, presents the results of the introduction of XPlate technology at Russian enterprises. **CONCLUSIONS.** When using the XPlate technology method at specific enterprises, more complete combustion of fuel occurs, the temperature of the coolant increases in a short time, specific fuel consumption decreases, and contamination of the boiler heating surfaces decreases sharply.

Keywords: XPlate™ technologies; blow fan; energy enterprise; industrial enterprises.

Acknowledgments: To the Limited Liability Company "QUANTUM ENERGY" represented by CEO Vasiliev Andrey Viktorovich.

For citation: Nizamova A.Sh., Shagieva G.K. Innovative fuel-saving technology to ensure fuel consumption savings at energy enterprises. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (2): 154-163. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-154-163.

Введение (Introduction)

Энергетическая стратегия России на период до 2035 года ставит своей целью наращивание душевого энергопотребления и энергетического потенциала страны. Растет доля электроэнергии, производимой гидроэлектростанциями (ГЭС), которая является на сегодняшний день самой дешевой. Общая мощность малых гидроэлектростанций превышает 1,2 ГВт. Доля гидроэлектростанций, включая гидроаккумулирующие электростанции, в структуре генерирующих мощностей составляет около 20 процентов.

Государственная политика России по ядерной энергетике нацелена на обеспечение безопасной и рентабельной эксплуатации ядерно-энергетического комплекса с созданием замкнутого ядерно-топливного цикла (ЗЯТЦ). Станции с ЗЯТЦ возможно уже будут сооружаться в ближайшем десятилетии. Доля рентабельных запасов урана в минерально-сырьевой базе Российской Федерации составляет около 7 процентов.

Электроэнергия на базе нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ) до последнего времени производилась в ограниченных масштабах. Сейчас расширяются масштабы применения НВИЭ. Основной проблемой использования возобновляемых источников энергии в Российской Федерации является их недостаточная экономическая конкурентоспособность по отношению к иным технологиям производства электрической энергии. Установленная мощность солнечных электростанций в Единой энергетической системе России в 2018 году достигла 0,834 ГВт, ветровых электростанций – 0,184 ГВт.

Нельзя не сказать и о водородной энергетике, которая способствует сокращению эмиссии диоксида углерода путем получения водорода из природного газа. Но несмотря на все выше сказанное, основными источниками получения электрической и тепловой энергии в мире и в России являются тепловые электрические станции (ТЭС), при эксплуатации которых стоит серьезная задача снижения уровня потребления топливно-энергетических ресурсов. Энергосбережение, то есть снижение расхода топлива при сжигании в энергетических котлах, водогрейных и паровых котлах множества промышленных котельных можно осуществить двумя путями:

- сокращением энергопотребления в результате проведения энергосберегающих технологий;
- снижением расхода топлива на единицу отпускаемой энергии благодаря эффективности ее производства.

Удельный расход топлива является одним из основных показателей рентабельности энергопредприятий. Поэтому снижение этого показателя всеми доступными способами является архиважной задачей. В связи с этим, исследования, представленные ниже имеют научную и практическую значимость.

Не исчерпаны еще возможности эффективного сжигания топлива в котлах, гарантирующих полноту сжигания топлива. Теплота сожженного топлива не полностью передается в котлах теплоносителю. Тепло теряется в окружающую среду, с уходящими газами, с химическим и механическим недожегом, с физической теплотой шлака, покидающего топку.

Потери тепла от химического недожега, т.е. газообразные горючие элементы CO, H₂, CH₄ могут не сгореть в котельном агрегате из-за пониженной температуры или недостатка кислорода. Поэтому в котлы воздух подают с избытком, а это влечет за собой повышение расхода электроэнергии на собственные нужды и увеличение расхода топлива. Одним из возможных способов снижения объема необходимого для сжигания

воздуха и расхода топлива в котельных агрегатах, плавильных печах и т.д. – применение технологии XPlate. Сущность технологии, согласно информации фирмы-разработчика, заключается в следующем. Одиночные молекулы кислорода и азота находящиеся в атмосферном воздухе, который подается в топку котла (печи) дутьевыми вентиляторами, обладают дипольными моментами, но за счет хаотического теплового движения они слабо взаимодействуют между собой. При принудительном движении воздуха воздушодувкой котла (печи), на стальных стенках вентилятора и воздушных трубопроводов образуются электростатические заряды, поле которых выстраивает молекулы кислорода и азота находящиеся в атмосферном воздухе упорядоченно таким образом, что за счет дипольного взаимодействия между собой, они образуют молекулярные воздушные кластеры (азот+кислород).

Взаимодействие углерода топлива с кластеризованным атмосферным воздухом (химическая реакция окислительного процесса) происходит менее интенсивно, по сравнению со случаем свободных (одиночных) молекул азота и кислорода, как за счет меньшей скорости диффузии кластеров, так и за счет меньшей вероятности столкновения с поверхностью топливной частицы молекулы кислорода в составе кластера. XPlate представляет собой многослойную композитную пластину, которая нивелирует данный эффект таким образом, что после участка с установленными пластинами XPlate большая часть молекулярных кластеров атмосферного воздуха разрушается на отдельные одиночные молекулы кислорода и азота, что в дальнейшем интенсифицирует последующие процессы химической реакции окисления углерода топлива с одиночными молекулами кислорода, что обеспечивает в итоге гарантированную полноту сгорания топлива, т.е. экономию его расхода.

Технология XPlate – зарубежная и возникла она в результате более чем 10-летних научных исследований в областях квантовой физики и квантовой химии. Первичным инициатором по разработке и применению технологии XPlate является английская компания Quantum Equilibrium International Ltd (QE), которой принадлежит патент. В основу работы НАНО технологии XPlate заложена инновационная концепция: Single molecule O₂.

К сожалению, очень мало научных публикаций в международных журналах описывающих процессы, позволяющие активизировать именно молекулу кислорода в общем кластере кислород+азот. Но немало опубликованных отчетов научно-исследовательских институтов и промышленных предприятий, которые исследовали и описали результаты применения XPlate пластин.

Работа [1] зарубежных авторов посвящена необычным магнитным свойствам кислородных кластеров. Отмечается, что магнитные системы, содержащие магнито-активные молекулы или молекулярные группы, могут проявлять необычные магнитные свойства.

В статье [2] исследована стабильность кислородных кластеров с числом атомов кислорода, варьирующими от двух до девяти в кластере. При расчетах использовались аппроксимации Хартри-Фока (HF), возмущения Моллера-Плессе второго порядка (MP2) и теория функционала плотности (DFT).

Авторы публикации [3] описали экспериментальные исследования проведенные сотрудниками кафедры «Теоретические основы теплотехники» Ивановского государственного энергетического университета (ИГЭУ). Экспериментальные исследования технологии были проведены в 2011 г. в котельной санатория «Зеленый городок» Ивановской области на базе двух котлов КВа-1,0 Гн и «Факел-Г». Испытания показали, что наложение XPlate пластины на улитку дутьевого вентилятора приводит к изменению цвета пламени. Это можно отметить как положительный эффект. Но далее авторы отмечают, что обработка и анализ результатов измерений не выявили однозначной зависимости влияния рассматриваемой технологии на параметры, измеряемые в ходе экспериментов. В то же время, указывают на значительные присосы воздуха в газовый тракт котла в стыковых швах газоходов котельных агрегатов. Присосы воздуха вносят существенную погрешность в измерение коэффициента избытка воздуха в топке котла и, соответственно, содержания кислорода в уходящих газах, а также влияют на температуру уходящих газов. В условиях проведения экспериментов отсутствовала возможность оценки величины присосов воздуха в газовый тракт через неплотности газохода. Следовательно, авторы согласны с некорректностью проведенных экспериментов.

Под руководством профессора В.Г. Лобанова на кафедре «Металлургии цветных металлов» Уральского Федерального Университета им. Б.Н. Ельцина были проведены испытания технологии XPlate в 2019 году [4]. В работе оценку эффективности технологии

XPlate проводили измерением окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) платинового электрода относительно хлор-серебряного электрода в различных средах. В опытах использовали иономер И-160М. Получены следующие результаты:

- в дистиллированной воде и в кислом растворе ОВП при аэрации с использованием пластин XPlate практически не отличаются от ОВП, полученных без XPlate;
- при аэрации нейтральных солевых и щелочных растворов ОВП с использованием пластин XPlate платинового электрода смещается в отрицательную сторону, что показывает термодинамическую возможность более интенсивного растворения.

Была произведена и оценка влияния технологии XPlate на кинетику растворения золота. Отмечено, что активация воздуха, используемого для окислительного растворения золота, с использованием технологии XPlate позволяет повысить скорость процесса на 15 – 20 %.

В июне 2022 года совместно РНПУП «Институт энергетики национальной академии наук Беларуси» и ООО «Квантум энерджи» провели испытания технологии XPlate на котлах ДКВР-10/13 ст.№3 мини-ТЭЦ «Восточная» филиала «Витебские тепловые сети» РУП «Витебскэнерго» [5]. Представлен очень подробный отчет. В ходе проведения испытаний подтверждено:

- снижение выбросов СО при химическом недожоге топлива около 131 ppm или на 33,8%;
- значительное снижение выбросов окислов азота в зависимости от исследуемых нагрузок котлоагрегата до 19,3 %;
- снижение удельных расходов топлива, измеренных по прямым показателям приборов в зависимости от режимов работы котлоагрегата от 1,84 % (при нагрузке 65 % от номинальной) до 3,93 % (при нагрузке близкой к номинальной) и как следствие снижение выбросов CO_2 .

В работе приведены все результаты испытаний, которые показывают значительный технико-экономический эффект от внедрения XPlate пластин. Динамические сроки окупаемости для исследуемого котла составили от 1,3 до 4,47 лет.

Промышленные испытания технологии XPlate были проведены также на медеплавильной печи «AUSMEL» ЗАО «Карабашмедь» в 2014 году [6] и на колбасном заводе CPF Food and Beverage Company Limited в Таиланде в 2020 году [7]. По результатам испытаний также была отмечена положительная тенденция применения XPlate пластин.

Выше описанная технология использовалась на многих предприятиях энергетической, тяжелой, пищевой промышленности Вьетнама, Индии, Кореи, Таиланда, России [8]. Во всех случаях отмечался значительный технико-экономический эффект.

Материалы и методы (Materials and methods)

Рассмотрим химический процесс взаимодействия молекул газа – метана с кислородом воздуха при горении.

Химическое уравнение указывает на полное сгорание, когда метан вступает в реакцию с кислородом, превращаясь в углекислый газ и воду.

В атмосферном воздухе содержится азота 78% и 21% кислорода. Иллюстрация межатомных сил в молекуле кислорода и в молекуле азота показана на рисунке 1.

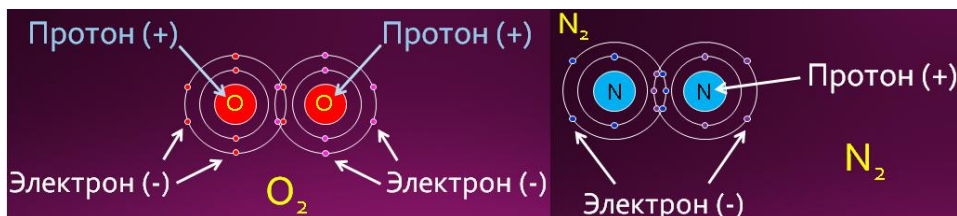


Рис. 1. Межатомные силы в молекуле кислорода и в молекуле азота Fig. 1. Interatomic forces in the oxygen molecule and in the nitrogen molecule

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

Одна молекула кислорода имеет 2 атома кислорода. Протон находится в центре, имея положительный заряд. Вследствие вытянутости электронных орбит в эллипс внешние электроны одних атомов кислорода притягиваются к другим атомам кислорода (и наоборот) и становятся общими для обоих атомов, что приводит к возникновению ковалентной (сцепной) связи атомов и образованию молекулы кислорода. Аналогичный процесс происходит и с атомами азота.

При нагнетании воздуха под давлением возникают сильные межмолекулярные связи между молекулами кислорода и азота. Ядра атомов кислорода притягивают электроны азота, заряжаются отрицательно, а атомы азота – положительно. Вследствие этого атомы кислорода притягиваются к атомам азота, то есть они «слипаются» и образуют кластер. Атомы кислорода находятся под оболочкой «шубой» атомов азота. Это явление показано на рисунке 2.

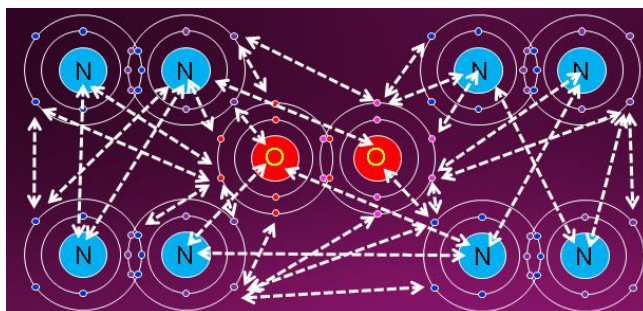


Рис. 2. Межатомные силы между молекулами кислорода и азота Fig. 2. Interatomic forces between oxygen and nitrogen molecules

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

Существует много сил между молекулами, которые связывают их вместе. Кислород составляет всего 20% или в четыре раза меньше, чем азот. Таким образом, азот имеет более высокую способность окружать кислород, захватив его внутрь. Далее будут образовываться более крупные кластеры (рис. 3).

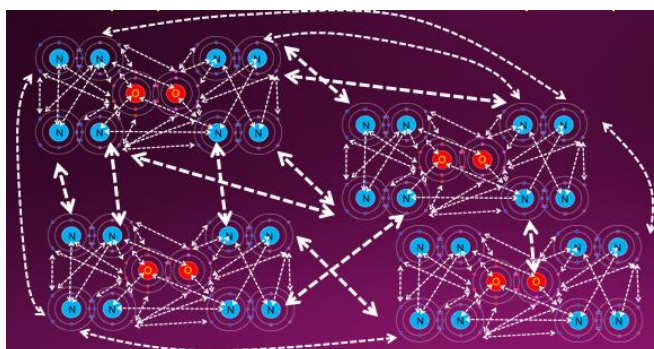


Рис. 3. Формирование молекулярного кластера воздуха Fig. 3. Formation of a molecular cluster of air

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

В таком кластере молекулы углерода в составе метана трудно «отыскать» молекулу кислорода для вступления в химическую реакцию окисления, что хорошо иллюстрировано на рисунке 4.



Рис. 4. Горение топлива с кластером кислорода Fig. 4. Combustion of fuel with an oxygen cluster. Gorenje

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

Одиночные молекулы кислорода и азота находящиеся в атмосферном воздухе, который подается в топку котла дутьевыми вентиляторами, обладают дипольными моментами, но за счет хаотичного теплового движения они слабо взаимодействуют между собой.

При принудительном движении воздуха воздуходувкой котла, на стальных стенках вентилятора и воздушных трубопроводов образуются электростатические заряды, поле которых выстраивает молекулы кислорода и азота, находящиеся в атмосферном воздухе упорядоченно таким образом, что за счет дипольного взаимодействия между собой, они образуют молекулярные воздушные кластеры (азот+кислород) (рис. 5).

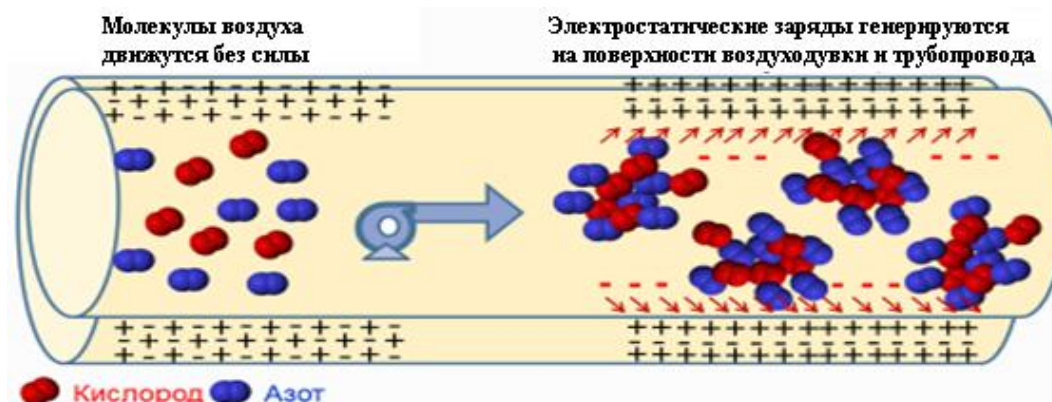


Рис. 5. Поток воздуха в трубе

Fig. 5. Air flow in the pipe

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

Взаимодействие углерода топлива с кластеризованным атмосферным воздухом (химическая реакция окислительного процесса) происходит менее интенсивно, по сравнению со случаем свободных (одиночных) молекул азота и кислорода, как за счет меньшей скорости диффузии кластеров, так и за счет меньшей вероятности столкновения с поверхностью топливной частицы молекулы кислорода в составе кластера.

В начале, когда поток атмосферного воздуха попадает в дутьевой вентилятор подачи воздуха на горение в котел, находящиеся в нем молекулы кислорода и азота находятся в свободном произвольном пространстве, и в этот момент сильного взаимодействия между ними нет. При попадании в воздуходувку, молекулы (кислород + азот) подвергаются воздействию давления, что заставляет их двигаться в одном направлении. И хотя кислород и азот являются неполярными молекулами, исследования в области квантовой физики показали, что эти неполярные молекулы, на самом деле являются неполярными только при наблюдении за ними в течение какого-то периода времени. Если сделать моментальные фотографии таких молекул, то они показали бы, что в определенный момент времени, колебаниям электронов вокруг ядра имеет место помеха в управлении электроном, которой достаточно, чтобы вызвать временный момент диполя. Этот момент диполя, быстро меняя свою магнитуду и направление, приходит к нулю в течение краткого периода времени. Однако, эти быстро меняющиеся диполи, производят электрическое поле, которое затем индуцирует диполи окружающих молекул. В результате этого индуцирования, возникает сила притяжения, которая иногда называется сила – «индуцированный диполь – индуцированный диполь».

XPlate представляет собой многослойную композитную пластину, которая нивелирует данный эффект таким образом, что после участка с установленными пластинами XPlate большая часть молекулярных кластеров атмосферного воздуха разрушается на отдельные одиночные молекулы кислорода и азота, что в дальнейшем интенсифицирует последующие процессы химической реакции окисления углерода топлива с одиночными молекулами кислорода, что обеспечивает в итоге гарантированную полноту сгорания топлива, т.е. экономию его расхода.

Xplate пластина должна заставить тот же положительный заряд (+) на внешней поверхности улитки вентилятора и трубопровода вернуться в нейтральное состояние. Как только второй слой станет нейтральным, третий слой, четвертый и другие слои последуют за ним. Возвращение к самому внутреннему слою станет уже окончательно нейтральным. Теперь это уже другая ориентация заряда, которая изменит ориентацию молекул кислорода и азота в воздухе (рис. 6).

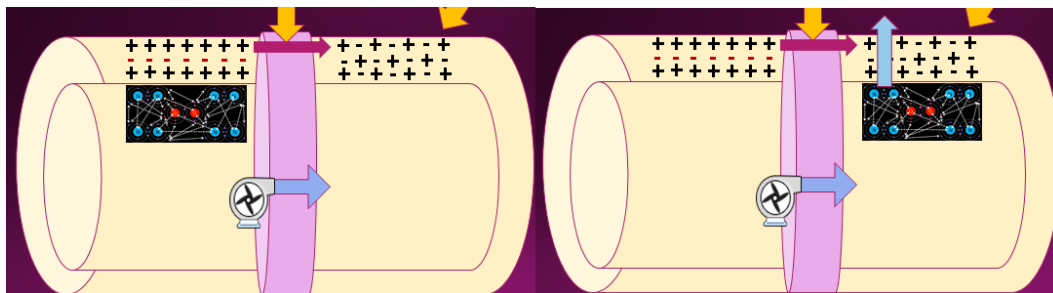


Рис. 6. Процесс нейтрализации зарядов на поверхностях, на которых установлены пластины XPLate

Fig. 6. The process of neutralizing charges on the surfaces on which the XPLate plates are installed

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

Практические результаты (Practical results)

Пластины Xplate, как утверждают производители, можно внедрять в различные технологические процессы, например, в процесс производства электро-теплоэнергии на ТЭС; в печах для производства цемента, обжига керамики, то есть на любых промышленных объектах сжигающих любое топливо при смешении с кислородом воздуха, а также в химических процессах, в основе которых лежит процесс окисления.

Пластины были применены на многих промышленных объектах мира и России в том числе. Представим некоторые результаты внедрения этой технологии.

Xplate пластины прошли апробацию на работающем газовом котле ТГМЕ-464 ст. № 4 ПАО «ТАТНЕФТЬ» ООО «Нижнекамская ТЭЦ» на энергетических котлах ТГМЕ-464, на водогрейных котлах КВГМ-4, работающих на газе, а также использующих технологическую нефть или различные марки мазута, на предприятиях ПАО «Северсталь» и ПАО «ЛУКОЙЛ». Xplate пластина устанавливается на внешней поверхности улитки дутьевого вентилятора. Внешний вид наружной поверхности пластины Xplate™ и ее внутренний композитный состав показаны на рисунке 7.

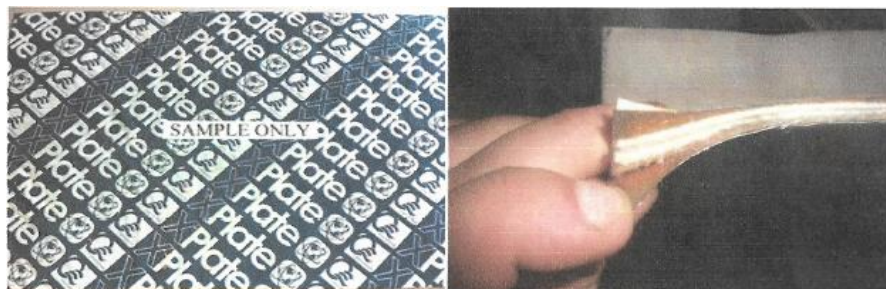


Рис. 7. Внешний вид наружной поверхности пластины Xplate™ и ее внутренний композитный состав

Fig. 7. The appearance of the outer surface of the Xplate plate and its internal composite composition

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

Примеры установки Xplate пластины на вентиляторах (воздуходувках), на газопроводах перед горелкой и т.д. показаны на рисунках 8 и 9.



Рис. 8. Установка XPLate пластин на воздушный вентилятор работающего котла ТГМЕ-464

Fig. 8. Installation of XPLate plates on the air fan of a working TGME-464 boiler

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



Рис. 9. Установка XPLate пластин на вентилятор водогрейного котла КВГМ-4 и на газовый трубопровод перед газовой горелкой

Fig. 9. Installation of XPLate plates on the fan of the KVGM-4 hot water boiler and on the gas pipeline in front of the gas burner

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

Результаты (Results)

При применении Xplate технологии на ПАО «ЛУКОЙЛ», в марте 2019 года с нефтяным топливом произошли следующие изменения:

- коэффициент избытка воздуха уменьшился на 0,4%.
- пламя горелки стало объёмным и коротким, что исключило обгорание выступающих дымогарных труб (колокольчиков) в поворотной камере;
- цвет пламени горелки котла изменился с желтого пульсирующего на спокойный молочно-белого цвета с красным отливом;
- сгорание нефти стало более полным;
- температура теплоносителя в течение 10 минут увеличилась на 5 градусов;
- снижение удельного расхода нефти на выработанную тепловую энергию:
 - малое горение: на 26,02%;
 - большое горение: на 9,06%;
 - в среднем: на 17,54%.

Кроме того, после останова и вскрытия котла был установлен ярко выраженный эффект резкого снижения загрязнения поверхностей нагрева котла продуктами сгорания нефти. Эти загрязнения были полностью смыты при промывке водой поверхностей нагрева котла в течение 30 минут. Тем самым достигнуто резкое снижение трудовых и финансовых затрат на очистку котла, а также снижены затраты вследствие простоя котла.

При установке Xplate пластин на дутьевой вентилятор котла ТГМЕ-464 ПАО «ТАТНЕФТЬ» ООО «Нижнекамская ТЭЦ» в марте 2021 года получены следующие результаты:

- увеличение выработки пара без изменения расхода природного газа;
- отмечен рост КПД котла на 0,6% (с 91,5% до 92%);
- удельный расход пара снизился на 1,2% при паровой нагрузке 360 т/час;
- максимальная паровая нагрузка по пару составила 517 т/час, при этом без применения технологии XPlate максимальная нагрузка по пару составляла 495 т/час;
- зафиксировано снижение NOx на 5% на аналогичных паровых нагрузках;
- при наработке котлом 5.000 ч/год, расходе газа котлом 30.000 м3./час и экономии газа в 1,2%, снижение выбросов CO2 (парниковые газы) в воздушный бассейн Нижнекамского промышленного узла составил ~ 4,3 тыс.т.н.т./год.

При переводе котла на сжигание резервного топлива (мазут) в который уже была введена присадка АВ-12 для снижения вязкости и экономии его, технология XPlate обеспечила:

- в диапазоне эксплуатационных нагрузок экономию мазута более 2,2%;
- при достигнутой экономии мазута соответственно уменьшаются выбросы CO2 при средней нагрузке 360 т/ч, так, например, при расходе топлива 20 т/ч снижение составляет 0,62 т. экв. CO2 – «углеродный след»;
- зафиксировано снижение NOx и SOx на 3-5% на аналогичных паровых нагрузках по сравнению с эксплуатацией до установки Xplate.

Исследования на Нижнекамской ТЭЦ проводились при участии ООО «Квантум Энерджи» и авторов статьи, сотрудников кафедры «Атомные и тепловые электрические станции» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Заключение (Conclusion)

XPlate – это инновационная топливосберегающая НАНО технология, не имеющая на сегодняшний день аналогов в мире. Xplate работает в автономном режиме без внешнего источника электропитания, что дополнительно обеспечивает безопасность ее эксплуатации на опасных технологических объектах. Для установки (инсталляции) Xplate пластин не требуется остановки работы энергоагрегата (котел, печь, сушильный барабан) или производственного цеха, а сама установка легко происходит в течение 30-40 минут на внешнюю поверхность улитки вентилятора подачи воздуха, силами одного, двух специалистов. Временной срок окупаемости: 10-16 месяцев.

В части инструментов по декарбонизации – снижению «углеродного следа» применение технологии XPlate может являться наименее затратным способом и наиболее эффективным. Гарантийный срок работы XPlate пластин – 2 года. Общий временной срок работы – 10 лет.

Инженерно-технические мероприятия с установкой XPlate пластин на энергетическом оборудовании, связанном с процессом горения в присутствии воздуха будет способствовать высоким экономическим результатам предприятия и получению прибыли.

XPlate технология может обеспечить экономию расхода топлива при использовании природного газа – 1,5-3,0%, при использовании мазута и тяжелых нефтяных остатков (ТНО) – 2,5-3,5%, при использовании нефти – 2-5%, при использовании биомассы более 5%.

Литература

1. Фрейман Ю.А., Ежовский А., Сумароков В.В. Теория аномалии теплового расширения твердого азота из-за примеси O_2 // Journal of physics C: Физика твердого тела. – 2008. – Т.19, № 27.
2. Адхикари Н.П. Фундаментальное исследование кислородных кластеров $(O)_n$, $n = 2 - 9$ и озона. // American Scientific Publishers Квантовая материя – 2016. – Т.5, № 3 – С. 379-382.
3. Бухмиров, В. В. Экспериментальное исследование новой технологии повышения эффективности сжигания топлива / В. В. Бухмиров, А. К. Гаськов, А. В. Данилов // Новости теплоснабжения. – 2012. – № 11. – С. 20-21. – EDN YRXBDP.
4. Лобанов В.Г. Технический отчет по результатам испытаний технологии XPlate на кафедре «Металлургии цветных металлов» Уральского Федерального Университета им. Б.Н. Ельцина // В.Г. Лобанов, К.Д. Наумов – 2019.»
5. Исследование влияния топливосберегающей технологии XPlate™ на эффективность работы котлоагрегатов // Отчет о научно-исследовательской работе РНПУП «Институт энергетики национальной академии наук Беларуси» – 2022
6. Отчет по итогам проведения промышленных испытаний технологии XPlate™ на медеплавильной печи «AUSMEL» ЗАО «Карабашмедь» – 2014. / <https://kvantenergo.by/xplate>
7. Отчет о результатах внедрения технологии XPlate™ на колбасном заводе CPF Food and Beverage Company Limited. Таиланд – 2020.
8. Neo Tech Energy Официальный диллер XPlate™ и MXT9 «Инновационная топливосберегающая технология XPlate™» <https://neotechenergy.ru/xplate>

Авторы публикации

Низамова Альфия Шарифовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Атомные и тепловые электрические станции (АТЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. nizamova_tes@mail.ru

Шагиева Гузель Камилевна – канд. техн. наук, ассистент кафедры «Атомные и тепловые электрические станции (АТЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. h.g.ka@mail.ru

References

1. Frejman Yu.A., Ezhovskij A., Sumarokov V.V. Teoriya anomalii teplovogo rasshireniya tverdogo azota iz-za primesi O_2 // Journal of physics C: Fizika tverdogo tela. – 2008. – Т.19, № 27.
2. Adhikari N.P. Fundamental'noe issledovanie kislorodnyh klasterov $(O)_n$, $n = 2 - 9$ i ozona. // American Scientific Publishers Kvantovaya materiya – 2016. – Т.5, № 3 – С. 379-382.
3. Buhmirov, V. V. Eksperimental'noe issledovanie novej tekhnologii povysheniya effektivnosti szhiganiya topliva / V. V. Buhmirov, A. K. Gas'kov, A. V. Danilov // Novosti teplosnabzheniya. – 2012. – № 11. – С. 20-21. – EDN YRXBDP.

4. Lobanov V.G. Tekhnicheskij otchet po rezul'tatam ispytaniy tekhnologii XPlate na kafedre «Metallurgii cvetnyh metallov» Ural'skogo Federal'nogo Universiteta im. B.N. El'cina// V.G. Lobanov, K.D. Naumov – 2019.»

5. Issledovanie vliyaniya toplivosberegayushchej tekhnologii XPlatetm na effektivnost' raboty kotloagregatov // Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote RNPUP «Institut energetiki nacional'noj akademii nauk Belarusi» – 2022

6. Otchet po itogam provedeniya promyshlennyh ispytaniyah tekhnologii XPlatetm na medeplavil'noj pechi «AUSMEL» ZAO «Karabashmed'» – 2014. / <https://kvantenergo.by/xplate>

7. Otchet o rezul'tatah vnedreniya tekhnologii XPlatetm na kolbasnom zavode CPF Food and Beverage Company Limited. Tailand – 2020.

8. Neo Tech Energy Official'nyj diller XPlatetm i MXT9 «Innovacionnaya toplivosberegayushchaya tekhnologiya XPlatetm » <https://neotechenergy.ru/xplate>Authors of the publication

Authors of the publication

Alfiya Sh. Nizamova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. nizamova_tes@mail.ru

Guzel' K. Shagieva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. h.g.ka@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **28.11.2024г.**

Отредактировано **14.02.2025 г.**

Принято **17.03.2025 г.**



ВОПРОСЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ УЗБЕКИСТАНА И МОНГОЛИИ

Умирова¹ Н.Р., Даваахуу¹ А., Морыганова¹ Ю.А., Никитина¹ И.С., Бураков¹ И.А.,
Ахметова И.Г.²

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

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

Резюме: Актуальность исследования заключается в решении экологических вопросов, относящихся к сбросу сточной воды на тепловых электрических станциях (ТЭС) Узбекистана и Монголии, которые приводят к необходимости применения и совершенствования методов ее очистки. **ЦЕЛЬ.** Рассмотреть проблемы очистки сточных вод на ТЭС. Провести исследование современных технологий по очистке сточных вод для применения их на ТЭС Узбекистана и Монголии. Рассмотреть наиболее простые, экономичные и бессточные технологии по обработке сточных вод на энергетических объектах. **МЕТОДЫ.** При решении поставленной задачи принят метод расчета объема сточных вод реализованный средствами SMath®. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье описана актуальность темы, рассмотрены проблемы очистки сточных вод на ТЭС. Произведен расчет объема производственных сточных вод, которые после предварительной очистки могут использоваться для технологических нужд ТЭС. В данной работе приведены данные по проведенным испытаниям сорбционных материалов нового поколения алюмосиликатного сорбента EcoFerox, активированного угля марки АК47 и АПТ-1 при концентрации НП $C_{НП} \approx 20 \text{ мг/дм}^3$ на основе дизельного топлива, трансформаторного и турбинного масел. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Разработана новая схема очистки и повторного использования сточных вод для действующих и проектируемых ТЭС Узбекистана и Монголии. Предложенное решение позволит частично решить проблемы водопотребления на энергетических объектах в условиях острой нехватки водных ресурсов. Полученные результаты показали, что сорбенты могут использоваться для доочистки сточных вод от НП до требуемых норм ПДК. Установлено, что наивысшая степень очистки сточных вод от НП достигается при использовании фильтров с двухслойной загрузкой.

Ключевые слова: производственная сточная вода; нефтепродукты; сорбент; фильтрующий материал; повторное использование очищенных сточных вод; предельно допустимые концентрации (ПДК); золошлаковые отходы.

Для цитирования: Умирова Н.Р., Даваахуу А., Морыганова Ю.А., Никитина И.С., Бураков И.А., Ахметова И.Г. Вопросы очистки сточных вод тепловых электрических станций Узбекистана и Монголии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 164-176. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-164-176.

ISSUES OF WASTEWATER TREATMENT FROM THERMAL POWER PLANTS IN UZBEKISTAN AND MONGOLIA

Umirova N.R., Davaahuu A., Moryganova J.A., Nikitina I.S., Burakov I.A., Akhmetova I.G.

National Research University "MPEI", Moscow, Russia
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
nilufarumirova@mail.ru

Abstract: RELEVANCE of the study lies in solving environmental issues related to the discharge of wastewater at thermal power plants (TPPs) in Uzbekistan and Mongolia, which lead to the need to apply and improve methods for its purification. **THE PURPOSE.** To consider the problems of wastewater treatment at thermal power plants. To conduct a study of modern technologies for wastewater treatment for their application at thermal power plants in Uzbekistan and Mongolia.

To consider the simplest, most economical and dischargeless technologies for wastewater treatment at energy facilities. **METHODS.** In solving the problem, the method of calculating the volume of wastewater implemented by means of SMath® was adopted. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, considers the problems of wastewater treatment at thermal power plants. The volume of industrial wastewater, which after preliminary treatment can be used for the technological needs of thermal power plants, is calculated. This paper presents data on the tests of new generation sorption materials: aluminosilicate sorbent EcoFerox, activated carbon grade AK47 and APT-1 at a concentration of petroleum products CPP $\approx 20 \text{ mg/dm}^3$ based on diesel fuel, transformer and turbine oils. **CONCLUSION.** A new scheme for cleaning and reusing wastewater for existing and planned thermal power plants in Uzbekistan and Mongolia has been developed. The proposed solution will partially solve the problems of water consumption at energy facilities in conditions of acute shortage of water resources. The obtained results showed that sorbents can be used for additional purification of wastewater from NP to the required MAC standards. It was established that the highest degree of purification of wastewater from NP is achieved when using filters with a two-layer load.

Keywords: industrial wastewater; petroleum products; sorbent; filter material; reuse of treated wastewater; maximum permissible concentrations (MPC); ash and slag waste.

For citation: Umirova N.R., Davaahuu A., Moryganova Yu.A., Nikitina I.S., Burakov I.A., Akhmetova I.G. Issues of wastewater treatment from thermal power plants in Uzbekistan and Mongolia. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (2): 164-176. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-164-176.

Введение (Introduction)

Узбекистан обеспечивает свои потребности за счет собственных энергоресурсов. Располагаемая генерирующая мощность страны составляет 12,9 ГВт, из них на долю ТЭС (11 ГВт) приходится около 85% вырабатываемой мощности. Эксплуатация ТЭС связана с использованием большого количества воды. Более 90% воды расходуется в системах охлаждения различных аппаратов: конденсаторов турбин, масло-воздухоохладителей, движущихся механизмов и др.

Водная проблема региона в настоящее время заключается в том, что ресурсы поверхностных вод практически полностью исчерпаны, а использование подземных вод требует дополнительной очистки.

Производство тепловой и электрической энергии на тепловых электрических станциях (ТЭС) сопровождается значительным потреблением водных ресурсов. Республика Узбекистан и Монголия столкнулись с острым дефицитом водных ресурсов, что может негативно отразиться на ключевом секторе экономики, таком как энергетика [1].

В 2021 году Правительством Республики Узбекистан был принят Закон «О воде и водопользовании» (№ ЗРУ-733). Этот закон направлен на сокращение забора воды из рек и прекращение сброса сточных вод путем совершенствования производственных технологий, а также внедрения систем оборотного и повторного водоснабжения.

Для решения проблем водопользования на энергообъектах Узбекистана необходимо проведение количественной оценки сточных вод (СВ) и их вклада в общий водный баланс ТЭС, внедрение современных технологий и схем очистки сточных вод, а также исследования сорбционных материалов нового поколения.

Требования к качеству сбрасываемых вод энергетических объектов в поверхностные водоемы с каждым годом повышаются. Ужесточение требований задает положительную динамику к развитию новых схем очистки сточной воды и использованию очищенных стоков для нужд ТЭС, уменьшению сброса воды в окружающую среду без увеличения водозабора [2].

Цель работы заключается в исследовании современных технологий по очистке СВ для применения их на ТЭС Узбекистана и Монголии. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: разработать схемные решения для интеграции новых технологий в схему очистки СВ на ТЭС Узбекистана и Монголии; выполнить экспериментальные исследования процессов сорбции нефтепродуктов (НП) с использованием сорбентов нового поколения при концентрации НП $C_{НП} \approx 20 \text{ мг/дм}^3$ для применения полученных результатов в разработанных технологических схемах очистки СВ;

Научная значимость исследования состоит в разработке нового подхода для очистки СВ на ТЭС в условиях острого дефицита природной воды; разработке методов и

алгоритмов расчета объема СВ на ТЭС, расположенных в различных географических регионах и климатических условиях с разным количеством выпадающих осадков; разработке схем очистки СВ для их повторного использования в технологическом цикле энергообъектов Узбекистана и Монголии, позволяющие значительно сократить дефицит воды.

Практическая значимость исследования заключается в разработке алгоритма расчета объема СВ на ТЭС. Впервые проведены испытания сорбционных материалов нового поколения алюмосиликатного сорбента EсоFerox, активированного угля марки АК47 и АПТ-1 при концентрации НП $C_{НП} \approx 20$ мг/дм³ на основе дизельного топлива, трансформаторного и турбинного масел. Полученные результаты показали, что сорбенты могут использоваться для доочистки сточных вод от НП до требуемых норм ПДК. Установлено, что наивысшая степень очистки сточных вод от НП достигается при использовании фильтров с двухслойной загрузкой.

Для того чтобы сточные воды не разрушали экосистему, установлены нормы качества сбрасываемой с промышленного объекта воды – нормативные допустимые сбросы загрязняющих веществ. Они рассчитываются так, чтобы состав загрязненных вод, сбрасываемых в природные водоемы, не превышал предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ в водоеме. Таким образом, к качеству сточных вод перед их сбросом предъявляются достаточно жесткие требования, при этом лимитирующими показателями загрязнений являются нефтепродукты и взвешенные вещества.

Одним из способов улучшения экологической ситуации является повторное использование очищенных сточных вод для нужд ТЭС, например, в системе оборотного охлаждения (СОО), на водоподготовительной установке (ВПУ) или на других промышленных предприятиях.

Вопросы очистки сточных вод ТЭС, а также сокращения и утилизации стоков в России активно изучались и продолжают исследоваться рядом ученых. Среди них можно выделить таких специалистов, как Покровский В.Н., Ларин Б.М., Иванов Е.Н., Седлов А.С., Шищенко В.В., Юрчевский Е.Б., Солодьянников В.В., Федосеев Б.С., Фейзиев Г.К. и другие. Важным вкладом в развитие данной области стало введение Седловым А.С. и Шищенко В.В. понятия «экологически безопасные ТЭС», что подчеркивает необходимость внедрения экологически ориентированных подходов в энергетике.

Концепция «нулевого сброса», появившаяся в XX веке, включает технологии выпаривания и кристаллизации сточных вод с последующим получением твердых осадков, их складированием и/или захоронением.

В настоящее время исследования в этой области продолжаются, причем акцент делается на поиск новых решений в области малосточных, ресурсосберегающих технологий. Проводятся масштабные работы по совершенствованию систем водопользования на ТЭС, направленные на сокращение объемов сточных вод и снижение их минерализации. Примером таких исследований могут служить работы ученых Чичеровой Н.Д., Чичерова А.А., Николаевой Л.А., Филимоновой А.А.

Экологическими аспектами энергетики и промышленности занимаются Еремина Н.А., Ксенофонтов Б.С., Карманов А.П.

Особый интерес представляют исследования Громова С.Л., Долгова Е.К., Рябчикова Б.Е., Пантелеева А.А., Первова А.Г., посвященные вопросам уменьшения сбросов сточных вод с водоподготовительных установок, оснащенных современными мембранными технологиями.

Таким образом, проблема очистки сточных вод ТЭС и сокращения их объема является актуальной и продолжает разрабатываться как в России, так и за рубежом, с учетом современных экологических требований и технологических возможностей, что подчеркивает важность дальнейших исследований и внедрения инновационных решений.

Материалы и методы (Materials and methods)

Мубарекская ТЭЦ (МТЭЦ) производит электроэнергию и отпускает технологический пар на Мубарекский газоперерабатывающий завод (МГПЗ). Проектная мощность станции составляет 60 МВт, в настоящий момент 25 МВт. В состав основного оборудования входят 3 паровых котла марки ТГМЕ-464, паропроизводительностью 500 т/час. Основное топливо – природный газ.

Пар после использования в турбине направляется на МГПЗ и возвращается в виде конденсата, который очищается на конденсатоочистке. Производительность конденсатоочистки от 220-250 м³/час.

Вода сырая (техническая) поступает на натрий катионирование и дальше умягченная вода идет на испарительные установки. Производительность установки 145 м³/час.

Для подпитки СОО необходимо 70 м³/час воды.

Требуемый расчетный объем технической воды на производственные нужды (подпитку котлов, СОО), а также поверхностные стоки с территории МТЭЦ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Водопотребление и водоотведение на МТЭЦ
Water consumption and sanitation at MTPP

№	Наименование	Водопотребление		Водоотведение	
		Ез.изм.	Кол-во	Ез.изм.	Кол-во
1	Производственные	тыс. м ³ /год	1884	тыс. м ³ /год	193
2	Хозяйственно питьевые	тыс. м ³ /год	6	тыс. м ³ /год	6
3	Полив территории и зеленых насаждений	тыс. м ³ /год	6	тыс. м ³ /год	2
	Всего:	тыс. м ³ /год	1896	тыс. м ³ /год	201

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

По расчетным данным общее количество необходимой для технологического процесса воды на МТЭЦ составляет 1896 тыс. м³/год, а общее количество образующихся стоков по расчету составляет 201 тыс. м³/год.

Из-за засушливого года и острого дефицита воды фактически в 2020 году на МТЭЦ поступила техническая вода в количестве 876 тыс. м³/год, а в 2021 году 1375,0 тыс. м³/год.

В ближайшее время реконструкция МТЭЦ не предусматривается.

Все стоки МТЭЦ поступают на пруд-испаритель МГПЗ.

В таблице 2 приведены данные по составу сточных вод МТЭЦ, отводимых на пруд-испаритель, в котором происходит испарение воды и просачивание в почву.

Таблица 2

Table 2

Состав сточных вод МТЭЦ, поступающих на пруд-испаритель
The composition of MTPP wastewater entering the evaporator pond

Показание состава сточных вод	Допустимая концентрация	Фактическая концентрация
ХПК, мг/дм ³	15,0	7,33
рН	6,5-8,5	7,8
Сухой остаток, мг/дм ³	1000,0	459,16
Взвешенные вещества, мг/дм ³	15,0	7,34
Сульфаты, мг/дм ³	100,0	42,25
Хлориды, мг/дм ³	300,0	151,83
Растворенный кислород, мг/дм ³	4-6	4,44
БПК ₅ , мг/дм ³	3,0	0,175
Азот аммония, мг/дм ³	0,5	0,44
Азот нитритов, мг/дм ³	0,08	0,006
Азот нитратов, мг/дм ³	45,0	6,719
Фосфаты, мг/дм ³	0,3	0,13
Железо, мг/дм ³	0,05	0,045
Нефтепродукты, мг/дм ³	0,05	0,028
Жесткость мг-экв/дм ³	7,0	7,875
Кальций, мг/дм ³	180,0	51,316
Магний, мг/дм ³	40,0	25,833
СПАВ, мг/дм ³	0,5	0,075

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Согласно Постановления Кабинета Министров Республики Узбекистан от 07.09.2020 года за № 541 «Об утверждении Положения о государственной экологической экспертизе в Республике Узбекистан» данное предприятие относится к III категории экологической опасности.

Исходя из данных представленных в таблице 1, ежегодно на пруд-испаритель МГПЗ поступает более 200 тыс. м³/год сточных вод МТЭЦ, то есть около 10% воды безвозвратно теряется при испарении. А эту воду после определенной степени очистки можно снова пускать в технологические процессы.

Предложена принципиальная технологическая схема повторного использования сточных вод производственного цикла (рис. 1).

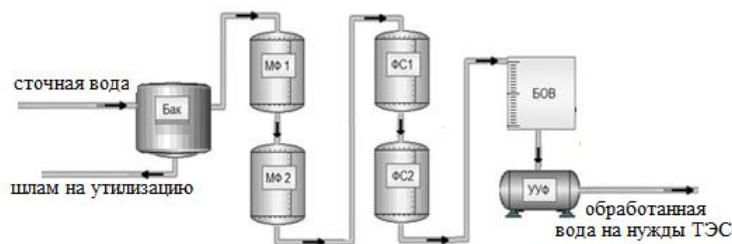


Рис. 1. Схема очистки сточных вод для Мубарекской ТЭЦ: 1 – бак аккумулирующий; 2 – механические фильтры I и II ступени (МФ1, МФ2); 3 – сорбционные фильтры I и II ступени (ФС1, ФС2); 4 – бак очищенной воды (БОВ); 5 – блок обеззараживания на УФ-лучах (УУФ); 6 – обработанная вода на повторное использование

Fig. 1. Wastewater treatment scheme for the Mubarek TPP: 1 – storage tank; 2 – mechanical filters of the first and second stages (MF1, MF2); 3 – sorption filters of the first and second stages (FS1, FS2); 4 – tank of purified water; 5 – unit of disinfection on UV rays (UVF); 6 – treated water for reuse Usage

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

Механический фильтр МФ1 оборудован сетчатым фильтром для очистки сточных вод от грубодисперсных примесей (ГДП), МФ2 загруженный гидроантрацитом предназначен для очистки сточных вод от мелкодисперсных примесей (МДП). Сорбционные фильтры предусмотрены для удаления нефтепродуктов (НП). ФС1 загружен сорбционным материалом ЕсоFerox, на поверхности которого образуется пленка из НП и хорошо задерживается на ней, а ФС2 загружен сорбентом АК47, который по своей природе имеет свойство впитывать в себя НП. При применении в этой схеме второго сорбционного фильтра (ФС2) остаточное содержание нефтепродуктов в очищенной воде не превысит 0,05 мг/л.

Проведены эксперименты по сорбции нефтепродуктов и предлагается использование двухслойной загрузки сорбционных материалов в фильтр ФС2. Это позволит достичь более высокого качества очистки воды от примесей по сравнению с однослойной загрузкой.

На кафедре ТОТ были проведены исследования сорбентов типа БАУ, АК47, АПТ-1, АПТ-2, АПТ-4, АПТ-8, ЕсоFerox и других минеральных и природных сорбентов [3]. Использование комбинированных загрузок сорбционных материалов позволяет добиться наилучших результатов и высокого качества очистки воды от примесей.

После сорбционных фильтров вода поступает в бак очищенной воды, из которого насосами подаётся на установку ультрафиолетового обеззараживания (УУФ). Метод УФ-обеззараживания позволяет удалить микробиологическое загрязнение и отказаться от использования реагентной обработки стоков. Обработанная вода может быть направлена на технологические нужды СОО или на подпитку ВПУ.

При повторном использовании производственных сточных вод водопотребление уменьшится на Мубарекской ТЭЦ 8-11%.

Наиболее популярными исходными материалами для создания волокнистых нефтяных сорбентов являются полипропилен, полимер, вата, войлок, ткани, синтепон, базальтовое волокно. Особенность волокнистых материалов заключается в глубоком поглощении нефти, так как волокна способны раздвигаться, тем самым создавая структуру сорбент–нефтепродукт, которая постепенно сжимается под действием силы тяжести, и укрупненные частицы нефтепродуктов (до 20-25 %) сливаются вниз.

Волокнистые сорбенты могут быть использованы на ТЭС для оперативной ликвидации небольших утечек (разливов) нефтепродуктов (мазута, масла).

Основной задачей данной работы был анализ современных материалов с целью применения их для очистки замасленных и замазученных вод ТЭС [4-6]. На современном рынке предложены материалы нового поколения, работающие по принципу коалесценции.

К сорбентам нового поколения относится сорбент АПТ-8, который представляет собой нетканый, волокнистый материал, выполненный в виде полотна, сформированного в единую, объемную структуру из скрепленных между собой гидрофобных алюмосиликатных и полимерных волокон. При таком способе формирования создаются дополнительные емкие полости, в которые нефтепродукты свободно проникают при непосредственном контакте, заполняя весь объем полотна за счет капиллярных сил, и прочно держатся внутри волокнистой структуры сорбента за счет адгезии.

Проведены испытания сорбента АПТ-8.

На ТЭЦ сепаратор АПТ с сорбентом АПТ-8 может быть установлен в местах образования загрязненных сточных вод: мазутохозяйство, маслохозяйство. Очищенную с помощью сепаратора воду можно подавать сразу на механические и сорбционные фильтры с активированным углем.

Для горно-обогатительного комбината (ГОК) «Эрдэнэт» (Монголия) авторским коллективом разработаны предложения по усовершенствованию схемы водопользования, цель которых повторное использование сточных вод ТЭС ГОК «Эрдэнэт» в структуре ГОК. В частности, прошедшая ступень очистки на АПТ-1 сточная вода с ТЭС ГОК поступает на ступень флотации ГОК, что позволяет повысить извлечение медного концентрата из исходного коллективного (медно-молибденового) концентрата. Предлагаемая усовершенствованная схема представлена на рисунке 2. Отличие предлагаемой схемы отныне действующей состоит в том, что поток сточных вод ГОК ТЭС «Эрдэнэт» подаётся в ИФО ГОК «Эрдэнэт», а не в Зумпф и затем в хвостохранилище.

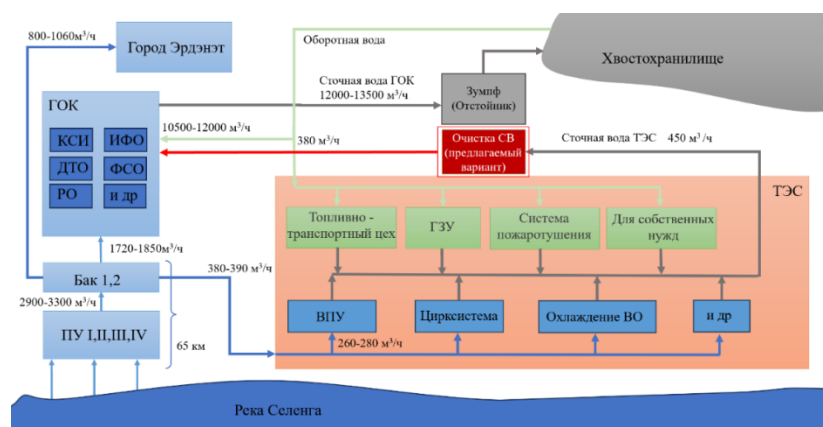


Рис. 2. Предлагаемая усовершенствованная схема сточных вод ТЭС и ГОК «Эрдэнэт»

Fig. 2. Proposed improved scheme of wastewater from the Erdenet Thermal Power Plant and the Erdenet Mining and Processing Plant

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

На этапе очистки сточных вод (на рис. 2 обозначена «Очистка СВ») предполагается организовать фильтрационный барьер, который будет обеспечивать уменьшение концентраций химических примесей в сточных водах. На этапе очистки сточных вод предполагается использовать сорбент «нового поколения» АПТ-1.

Сорбент АПТ-1 представляет собой каталитический фильтрующий материал, используемый для очистки воды (в большей части для очистки от соединений железа и марганца). Как известно, эффективность процесса фильтрования зависит от многих свойств сорбционного материала, в том числе и от шероховатости поверхности. Для того, чтобы посмотреть, как выглядит поверхность сорбционного материала АПТ-1, были сделаны фотографии поверхности материалов на цифровом микроскопе КН-8700 с 2500-кратным увеличением представлен на рисунке 3(а) [4]. Представленное фото поверхности сорбента помогает лучше объяснить процессы сорбции. Внешний вид материала представлен на рисунке 3(б). На представленном фото поверхность фильтрующего материала видно, что сорбент АПТ-1 обладает развитой пористой структурой, поры крупные. На поверхность сорбента-АПТ-1 – поры размером от 7 до 50 мкм, глубиной до 60 мкм.

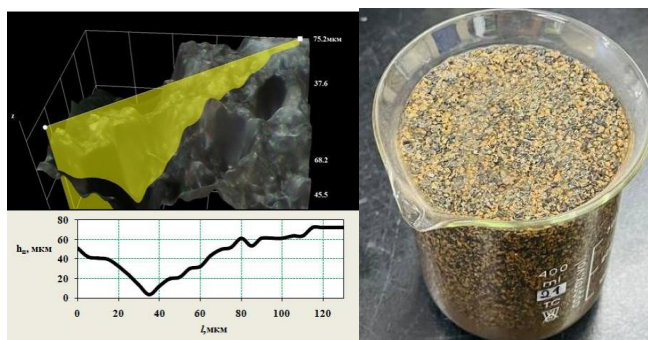


Рис. 3. Сорбент АПТ-1: (а) под микроскопом, (б) внешний вид

Fig. 3. Sorbent APT-1: (a) under a microscope, (b) external appearance

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

В процессе проведения эксперимента испытуемый водный раствор (сточные воды ТЭС ГОК «Эрдэнэт») самотёком подавался через фильтровальную колонну, загруженную АПТ-1 (рис. 4). Очищенная вода, прошедшая сорбирующий слой, собиралась в ёмкость (лабораторная колба). В исходной и очищенной воде (после колонны) в водно-химической лаборатории ТЭС ГОК «Эрдэнэт» определялись химические показатели, представленные в таблице 3.

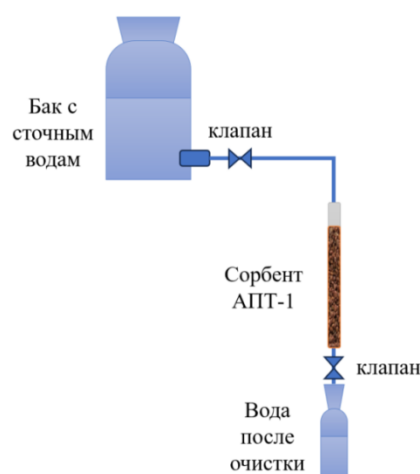


Рис. 4. Фото и схема испытательного стенда в водно-химической лаборатории ТЭС ГОК «Эрдэнэт»
Fig. 4. Photo and diagram of the test bench in the water-chemical laboratory of the TPP GOK "Erdenet"

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

Таблица 3

Table 3

Изменение показателей химического состава сточных вод ТЭС ГОК «Эрдэнэт» при использовании АПТ-1

Changes in the indicators of the chemical composition of wastewater from GOK "Erdenet" thermal power plant using APT-1

№	Показатели качества водных растворов	Используемый стандарт для анализа	Испытуемый раствор (сточные воды ТЭС)	Раствор после пропускa через сорбент АПТ-1
1	Na^+ , мг/дм ³	MNS 4335:1996 MNS 4341:1996 MNS 1097:1970 MNS 4423:1997 MNS 10523:2001 MNS ISO 8288:1999 MNS ISO 99631:2001	135,3	124.9
2	K^+ , мг/дм ³		48,2	39.09
3	Mo^{3+} , мг/дм ³		0,960	0.915
4	NH_4^+ , мг/дм ³		3,86	3.68
5	Cu^{2+} , мг/дм ³		0,036	0.018
6	Ca^{2+} , мг/дм ³		458,29	194.43
7	Mg^{2+} , мг/дм ³		28.89	10.98
8	Zn^{2+} , мг/дм ³		0.054	0.129
9	Fe^{2+} , мг/дм ³		0.542	0.307
10	Cd^{2+} , мг/дм ³		0.005	-
11	Pb^{2+} , мг/дм ³		0.052	-
12	Cl^- , мг/дм ³		19.35	16.68
13	SO_4^{2-} , мг/дм ³		1506.08	1328.81
14	NO_3^- , мг/дм ³		9.55	11.3
15	NO_2^- , мг/дм ³		0.14	0.125
16	HCO_3^- , мг/дм ³		59.02	45.90
17	CO_3^{2-} , мг/дм ³		-	-
18	Si^{3+} , мг/дм ³		0.042	-
19	Ag^+ , мг/дм ³		0.003	-
20	Сухой остаток, мг/дм ³		2424	2310
21	H_2SiO_3 , мг/дм ³		20.62	23.13
22	pH, ед.		6.372	7.426
23	Общая жесткость, мг-экв/дм ³		25.25	10.59

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Анализ результатов испытаний, представленных в таблице 3, даёт понимание о снижении следующих показателей: общая жесткость снизилась в 2,38 раза; концентрация Ca^{2+} снизилась в 2,35 раза; концентрация Mg^{2+} снизилась в 2,63 раза; концентрация меди снизилась в 2 раза; для всех остальных показателей наблюдается незначительное снижение.

Таким образом, применение фильтров, загруженных АПТ-1, позволяет получить обработанную воду более высоко качества. А корреляционное исследование с применением метода Decision Tree Regressor [5] позволяет делать прогнозирование количества извлекаемой меди из сточных вод. До очистки извлечение меди составляло 86,7%. По расчетам после применения сточных вод ТЭС ГОК «Эрдэнэт» извлечение меди увеличилось до 87,1%, что соответствует росту на 0,4%.

Однако, применение схемы, представленной на рис. 2 имеет проблемной наличие общего сточного коллектора, куда, в том числе производится подача и промывочной воды после системы гидро-золоудаления (ГЗУ) ТЭС ГОК «Эрдэнэт». В промывочной воде во взвешенном состоянии присутствует значительное количество золошлаковых отходов (ЗШО) сжигания угля. В связи с этим, существует необходимость разделения потоков сточных вод ТЭС ГОК «Эрдэнэт» на общий поток сточных вод и на поток сточных вод с системы ГЗУ ТЭС.

Авторский коллектив, решая обозначенную выше проблему, поставил задачу разработки системы извлечения из сточных вод (пульпы) системы ГЗУ несгоревшего от недожѐга в котлах станции угля (по [8] на данную проблему активно обращают внимание промышленные и энергетические предприятия по всему миру). Для этого были рассмотрены способы разделения разноплотных твёрдых веществ, представленные в работах [6].

Выделяя разновидности систем золоудаления наиболее широко применимыми являются системы гидрозолоудаления (ГЗУ) и пневмотранспорта золы и шлаков [7-8]. Подавляющее большинство энергетических объектов, согласно [9] имеет систему ГЗУ. На ТЭС ГОК «Эрдэнэт» функционирует система ГЗУ. В рамках исполнения основных принципов функционирования обновлённой системы ГЗУ предполагается включение в неё ступени позволяющей извлекать из пульпы ЗШО частицы несгоревшего угля.

Реализация методов разделения разноплотных веществ, представленных в [10] базируется на подачи исходного угля в рабочую зону сепаратора, заполненного тяжѐлой однородной (однофазной) высокоплотной средой (природными подземными хлоридными натриевыми рассолами, бишофитом, сточными высокоплотными водами Na-катионитных фильтров). Более лёгкие частицы (имеющие меньшую плотность) под действием гравитационных сил всплывают вверх, более тяжѐлые (более плотные) тонут. Всплывшие частицы представляют собой угольный концентрат (уголь с повышенной теплотой сгорания и пониженной зольностью), утонувшие – отходы обогащения (уголь с пониженной теплотой сгорания и повышенной зольностью). Иллюстрация описанному представлена на рисунке 5.

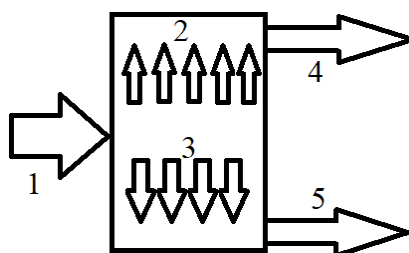


Рис. 5. Схема реализации гравитационных процессов обогащения с применением в качестве тяжѐлой среды высокоминерализованных водных растворов природного и техногенного происхождения: 1 – исходный уголь; 2 – лёгкий продукт; 3 – тяжѐлый продукт; 4 – концентрат угля; 5 – отходы обогащения

Fig. 5. Scheme of implementation of gravity enrichment processes using highly mineralized aqueous solutions of natural and man-made origin as a heavy medium: 1 – the source coal; 2 – the light product; 3 – the heavy product; 4 – the coal concentrate; 5 – the enrichment waste

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

С целью проведения основной экспериментальной работы в рамках функционирования учебно-научной лаборатории анализа топлива и энергетических масел НИУ «МЭИ» были подготовлены образцы:

– ЗШО угля месторождения Шарын гол;

- ЗШО угля месторождения Багануур;
- ЗШО угля месторождения Налайх.

Помимо этого, с ТЭС ГОК «Эрдэнэт» была отобрана и привезена в НИУ «МЭИ» проба ЗШО, которую отобрали непосредственно из системы золоудаления, из воронки котла.

Обозначенные выше угли были выбраны в связи с территориальным расположением ГОК «Эрдэнэт» и ТЭС ГОК «Эрдэнэт» (угли месторождения ШАрын гол являются основным энергетическим топливом на ТЭС ГОК «Эрдэнэт»; месторождения Багануур и Налайх находятся в непосредственной близости от ТЭС ГОК «Эрдэнэт»). В таблице 4 представлены энергетические характеристики выбранных углей.

Таблица 4

Table 4

Характеристики углей, рассматриваемых в работе месторождений Монголии

Characteristics of the coals considered in the work of deposits in Mongolia

Месторождение угля	Элементарный состав, %						
	C ^a	H ^a	S ^a	O ^a	N ^a	A ^a	W ^a
Шарын гол	44,6	3,2	0,7	7,9	0,9	34,8	9,0
Багануур	60,4	3,9	0,6	21,3	1,3	6,0	7,0
Налайх	55,6	4,9	0,3	21,1	0,3	11,5	6,3

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Общий вид, подготовленных для исследований ЗШО, представлен на рисунке 6.



Рис. 6. Общий вид ЗШО, подготовленных для исследования

Fig. 6. General view of the ash and slag waste prepared for the study

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

В рамках проведения экспериментальной работы исходную пробу (масса исходной пробы 2 г) обогащаемой смеси ЗШО (все 4 вида: ЗШО Шарын гол; ЗШО Багануур, ЗШО Налайх; ЗШО ТЭС ГОК «Эрдэнэт» (Шарын гол)) помещали в лабораторный стакан с предварительно налитой туда тяжёлой средой. Плотность тяжёлой среды варьировалась от плотности чистой воды до высокоминерализованного раствора и составляла 1000 кг/м³; 1050 кг/м³; 1100 кг/м³; 1150 кг/м³; 1200 кг/м³. После гравитационного разделения всплывшие частицы угля и утонувшие ЗШО извлекались, промывались водой из системы водоснабжения НИУ «МЭИ» общим солесодержанием до 300 мг/дм³, затем высушивались естественным путём (на открытом воздухе при температуре окружающей среды 23-24 °С). После высушивания определялась масса извлечённых частиц угля и отходов обогащения. Взвешивание проводилось на лабораторных весах Charites YUC 500gx0.01g.

Согласно схеме экспериментальной работы, представленной на рисунке 5, реализовывались исследования возможности извлечения несгоревшего угля из смеси ЗШО.

Визуализация выделения из подготовленных образцов ЗШО несгоревших частиц угля с применением метода гравитационного обогащения, разработанного на кафедрах ТОТ и ТЭС НИУ «МЭИ», представлена на рисунке 7.

В таблице 5 представлены результаты извлечения несгоревшего угля из исходных золошлаковых смесей.

По полученным результатам были построены зависимости массовой доли угля, извлечённого из смесей ЗШО, от плотности тяжёлой среды. Зависимость представлена на рисунке 8.



Рис. 7. Визуализация обогащения ЗШО угля месторождений Монголии

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

Таблица 5

Table 5

Извлечение несгоревшего угля из ЗШО. Результаты экспериментальной работы
Extraction of unburned coal from ash and slag waste. The results of the experimental work

Исходная смесь ЗШО	Процент извлечённых несгоревших угольных частиц, %				
Плотность тяжёлой среды, кг/дм ³	1000,00	1050,00	1100,00	1150,00	1200,00
ЗШО Шарын гол	0,00	0,50	4,50	11,00	13,00
ЗШО Багануур	0,50	2,00	2,00	2,50	7,00
ЗШО Налайх	0,00	0,00	5,00	6,00	6,50
ЗШО ТЭС ГОК «Эрдэнэт» (Шарын гол)	0,00	0,00	2,00	5,00	6,00

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

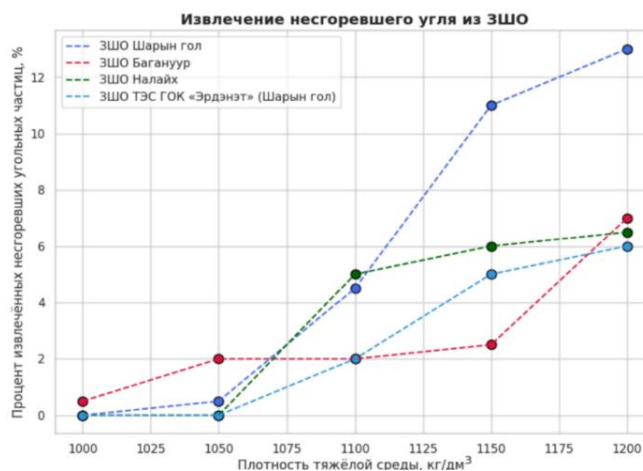


Рис. 8. Визуализация зависимости массовой доли угля, извлечённого из смесей ЗШО, от плотности тяжёлой среды

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

Полученные результаты дают понимание возможности реализации представленной технологии извлечения несгоревших угольных частиц в системе ГЗУ ТЭС ГОК «Эрдэнэт». Однако реализация представленной технологии требует схемных решений для системы функционирования ТЭС ГОК «Эрдэнэт», которые будут подробно разобраны и описаны в четвертой главе текущего труда.

Для извлечённого же из смеси ЗШО угля необходимо понимание его качества, так как в зависимости от качества существует разнообразие путей применения данного угля после извлечения из ЗШО. В связи с обозначенной необходимостью уголь, извлечённый из ЗШО, представленным выше способом, подвергался исследованию для определения его характеристик (FC , W^a , A^a , V^{daf}) по методикам, представленным в ГОСТ Р 55661-2013, ГОСТ 11014-2001 и ГОСТ Р 55660-2013.

Последовательность действий заключалась в экспериментальном определении W^a , A^a , V^{daf} в пробах несгоревшего угля, извлечённых с применением тяжёлой среды плотностью 1100 кг/м³ (плотность определена в соответствии с минерализацией подземных

рассолов, имеющихся в наличии на территории Республики Монголия) и дальнейшем расчёте теплоты сгорания рассматриваемых углей по заранее подобранных формулам (1 – 3) корреляции Бойе/Кирова, группы исследователей под руководством Демирбаш и группы исследователей под руководством Парих из [12-16]. Формулы представлены ниже:

– формула Демирбаш (1) [12, 13]:

$$Q_s^a = 0,196 * FC + 14,119 \quad (1)$$

– формула Парих (2) [14, 15]:

$$Q_s^a = 0,3536 * FC + 0,1559 * V^a - 0,0078 * A^a \quad (2)$$

– формула из корреляции Бойе/Кирова (3) [16]:

$$Q_s^a = 35,4 * FC + 3,568 \quad (3)$$

Результаты экспериментальной и последующей расчётной работы представлены в таблице 6.

Таблица 6

Table 6

Характеристики углей, извлечённых из ЗШО
Characteristics of coals extracted from ash and slag waste

Исходная смесь ЗШО (уголь месторождения)	Характеристики углей			
	A ^a , %	W ^a , %	V ^{daf} , %	Q _s ^a , МДж/кг
ЗШО Шарын гол	42,0	11,0	34,5	13,02
ЗШО Багануур	28,5	8,0	42,0	16,61
ЗШО Налайих	12,5	8,0	42,0	22,04
ЗШО ТЭС ГОК «Эрдэнэт» (Шарын гол)	25,0	10,5	33,0	18,32

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Представленные в таблице 6 результаты прошли сравнение с данными, представленными в таблице 4.

Увеличение зольности на аналитическую массу в пробах извлечённого угля для ЗШО месторождений Шарын гол и Налайих, а также значительное увеличение зольности для ЗШО Багануур говорит о том, что вместе с извлечённым углём всплывает и часть ЗШО, а это означает, что в качестве тяжёлой среды следует использовать менее плотные высокоминерализованные растворы. Уменьшение же зольности на аналитическую массу в извлечённом угле из смеси ЗШО ТЭС ГОК «Эрдэнэт» указывает на то, что для реальных ЗШО тяжёлая среда плотностью 1100 кг/м³ подобрана верно, так как уменьшение зольности извлечённого угля указывает на то, что в концентрат попадают только лёгкие фракции. Остальные показатели W^a, V^{daf} меняются не значительно и решающего влияния на качество угля не оказывают.

Извлечённый уголь можно обратно направлять в систему топливоподачи на котлы ТЭС ГОК «Эрдэнэт», либо использовать в качестве исходного сырья для процессов брикетирования.

Выводы (Conclusions)

Для решения вопросов острой нехватки воды для Мубарекской ТЭЦ Узбекистана предлагается очистка и повторное использование сточных вод производственного цикла.

Для Мубарекской ТЭЦ предложенная схема включает очистку сточных вод, содержащих небольшие концентрации нефтепродуктов (20-50мг/л). В схему включены сорбционные фильтры, загруженные новыми сорбентами нового поколения комплексного типа, позволяющими удалять нефтепродукты. Сорбенты прошли испытания на кафедре ТОТ НИУ «МЭИ».

Для ТЭС ГОК «Эрдэнэт» и ГОК «Эрдэнэт» Монголии предложена усовершенствованная схема очистки сточных вод. Применение предложенной схемы позволяет увеличить показатель извлечения медного концентрата. Величина роста извлечения составляет 0,4%.

Очистка сточных вод по разработанным и усовершенствованным схемам позволит повторно использовать сточные воды в цикле энергетических и промышленных объектов Узбекистана и Монголии.

Предлагаемая схема извлечения несгоревшего угля из пульпы ЗШО ТЭС ГОК «Эрдэнэт» позволяет извлекать до 13% несгоревших угольных частиц в зависимости от плотности тяжёлой среды и от исходного смеси ЗШО.

Литература

1. Умирова Н.Р., Никитина И.С. Новые решения по очистке сточных вод ТЭС Узбекистана от микробиологических загрязнений / Н.Р. Умирова // Водоподготовка и водно-химические режимы ТЭС. Сборник докладов: XI международной научно-технической конференции. М.: ВТИ, 2024. С-9.
2. Умирова Н.Р., Котенко, А.Ю., Зорин А.О., Анисимов А.Ю. Очистка ливневых стоков ТЭС Узбекистана / Н.Р. Умирова // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тезисы докладов: материалы XXIX международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Москва: – С. 715
3. Ко Ко М. Экспериментальное исследование сорбционных технологий для очистки сточных вод от нефтепродуктов на тепловых электростанциях Мьянмы // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: НИУ «МЭИ». 2018 –134 с.
4. Даваахуу А. Проблемы повторного использования и утилизации сточных вод горно-обогатительного комбината и ТЭС "Эрденет" / А. Даваахуу, И.А. Бураков // Водоподготовка и водно-химические режимы ТЭС. Цели и задачи: сб. докл. / под общ. ред. Р.В. Акулич // XI Международная научно-техническая конференция. – М.: АО «ВТИ», 2024. – 62 с, С. 51–55.
5. Путилова И.В. Обзор оборудования и схем систем золошлакоудаления ТЭС / И.В. Путилова // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2023. № 1 (406). С. 63-76.
6. Путилова И.В. Рекомендации по снижению абразивного износа гидротранспортных трубопроводов систем золошлакоудаления ТЭС / И.В. Путилова // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2020. № 31-33 (353-355). С. 81-92.
7. Егоркина М.А. Системы золоудаления на теплоэлектростанциях / М.А. Егоркина, М.В. Васина, Р.Ю. Васин // Актуальные вопросы энергетики. 2020. Т. 2. № 1. С. 105-110.
8. Аунг Х.Н. Разработка методов повышения эффективности получения экологически чистого топлива на основе переработки твёрдого топлива для условий Мьянмы // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: НИУ «МЭИ». 2023 –111 с.
9. Ёе В. А. Исследование эффективности применения процессов энерготехнологической переработки твёрдого топлива для его дальнейшего использования на тепловых электрических станциях в условиях Мьянмы / Ёе В.А. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. НИУ «МЭИ». 2023 – 125 с.
10. Аунг К.М. Разработка технологии использования высокоминерализованных сточных вод энергетических объектов в процессе обогащения углей для условий Мьянмы // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: НИУ «МЭИ». 2024 – 131 с.
11. A. Demirbaş. Fuel 76(5), 431 (1997).
12. D. Kavšek. Characterization of Slovenian coal and estimation of coal heating value based on proximate analysis using regression and artificial neural networks / D. Kavšek, A. Bednárová, M. Biro, R. Kranvogel, D. Brodnjak Vončina, E. Beinrohr // Cent. Eur. J. Chem.11(9).2013. p. 1481-1491.
13. T. Cordero, F. Marquez, J. Rodriguez-Mirasol, J.J. Rodriguez, Fuel 80, 1567 (2001).
14. J. Parikh, S.A. Channiwala, G.K. Ghosal, Fuel 84, 487 (2005).
15. C. Qian. Prediction of higher heating values of biochar from proximate and ultimate analysis / C. Qian, Q. Li, Z. Zhang, X. Wang, J. Hu, W. Cao // Fuel 265 (2020) 116925.

Авторы публикации

Умирова Нилуфар Равильевна – аспирант кафедры TOT, НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. nilufarumirova@mail.ru, UmirovaNR@mpei.ru

Даваахуу Амармурун – аспирант кафедры TOT, НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. DavaakhuuA@mpei.ru

Морыганова Юлия Августовна – канд. хим. наук, доцент кафедры TOT, НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. MoryganovaYA@mpei.ru

Никитина Ирина Сергеевна – канд. техн. наук, доцент кафедры TOT, НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. nikitinais@mpei.ru

Бураков Иван Андреевич – канд. техн. наук, доцент кафедры TOT, НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. BurakovIA@mpei.ru

Ахметова Ирина Гареевна – докт. техн. наук, доцент, проректор по развитию и инновациям Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7082-2005>. irina_akhmetova@mail.ru.

References

1. Umirova N.R., Nikitina I.S. New solutions for wastewater treatment of thermal power plants of Uzbekistan from microbiological contamination / N.R. Umirova // Water treatment and water-chemical

regimes of thermal power plants. Collection of reports: XI International Scientific and Technical Conference. Moscow: VTI, 2024. pp. 11-21.

2. Umirova N.R., Kotenko, A.Yu., Zorin A.O., Anisimov A.Yu. Cleaning of storm drains of thermal power plants of Uzbekistan / N.R. Umirova // Radio electronics, electrical engineering and power engineering. Abstracts: proceedings of the XXIX International Scientific and Technical Conference of students and postgraduates. Moscow: – p. 715.

3. Ko Ko M. Experimental study of sorption technologies for wastewater treatment from petroleum products at thermal power plants in Myanmar // Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow: NRU "MPEI". 2018 -134 p.

4. Davaahuu A. Problems of reuse and disposal of wastewater from the mining and processing plant and the Erdenet thermal power plant / A. Davaahuu, I.A. Burakov // Water treatment and water-chemical regimes of thermal power plants. Goals and objectives: collection of documents / under the general editorship of R.V. Akulich // XI International Scientific and Technical Conference. Moscow: JSC "VTI", 2024. – 62 p., pp. 51-55.

5. Putilova I.V. Overview of equipment and schemes of TPP ash and slag removal systems / I.V. Putilova // International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology. 2023. No. 1 (406). pp. 63-76.

6. Putilova I.V. Recommendations for reducing abrasive wear of hydrotransport pipelines of thermal power plant ash and slag removal systems / I.V. Putilova // International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology. 2020. No. 31-33 (353-355). pp. 81-92.

7. Yegorkina M.A. Ash removal systems at thermal power plants / M.A. Yegorkina, M.V. Vasina, R.Yu. Vasin // Actual issues of energy. 2020. Vol. 2. No. 1. pp. 105-110.

8. Aung H.N. Development of methods to increase the efficiency of obtaining environmentally friendly fuels based on solid fuel processing for Myanmar conditions // Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow: NRU "MPEI". 2023 - 111 p.

9. Ye V.A. Investigation of the effectiveness of the use of energy-technological processing of solid fuels for its further use at thermal power plants in Myanmar / Ye V.A. // Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow. NRU "MEI". 2023 – 125 p.

10. Aung K.M. Development of technology for the use of highly mineralized wastewater from energy facilities in the process of coal enrichment for the conditions of Myanmar // Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow: NRU "MPEI". 2024 – 131 p.

11. A. Demirbaş. Fuel 76(5), 431 (1997).

12. D. Kavšek. Characterization of Slovenian coal and estimation of coal heating value based on proximate analysis using regression and artificial neural networks / D. Kavšek, A. Bednárová, M. Biro, R. Kranvogel, D. Brodnjak Vončina, E. Beinrohr // Cent. Eur. J. Chem. 11(9).2013. p. 1481-1491.

13. T. Cordero, F. Marquez, J. Rodriguez-Mirasol, J.J. Rodriguez, Fuel 80, 1567 (2001).

14. J. Parikh, S.A. Channiwala, G.K. Ghosal, Fuel 84, 487 (2005).

15. C. Qian. Prediction of higher heating values of biochar from proximate and ultimate analysis / C. Qian, Q. Li, Z. Zhang, X. Wang, J. Hu, W. Cao // Fuel 265 (2020) 116925.

Authors of the publication

Nilufar R. Umirova – National Research University "MPEI", Moscow, Russia. nilufarumirova@mail.ru, UmirovaNR@mpei.ru

Davaahuu Amarmurun – National Research University "MPEI", Moscow, Russia. DavaakhuaA@mpei.ru

Julia A. Moryganova – National Research University "MPEI", Moscow, Russia. MoryganovaYA@mpei.ru

Irina S. Nikitina – National Research University "MPEI", Moscow, Russia. nikitinais@mpei.ru

Ivan A. Burakov – National Research University "MPEI", Moscow, Russia. BurakovIA@mpei.ru

Irina G. Akhmetova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. irina_akhmetova@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено 07.02.2025 г.

Отредактировано 11.03.2025 г.

Принято 15.03.2025 г.



МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК

Политова Т.О., Загретдинов А.Р., Сидоров М.В., Зиганшин Ш.Г., Ваньков Ю.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

politovatatyana@yandex.ru

Резюме: Целью работы является исследование возможности использования искусственного интеллекта для нахождения течей, используя данные для обучения, полученные с помощью виброакустических датчиков. В работе описаны методы постоянного контроля. Представлены методы периодического контроля обнаружения протечек в трубопроводе. Были проделаны испытательные работы на лабораторном стенде. Рассмотрены методы для машинного обучения, а именно бустинг, k-ближайших соседей, метод случайного леса, метод многослойной нейронной сети. Разработан алгоритм для составления массивов данных. Показаны результаты работы программы.

Ключевые слова: утечки; трубопровод; контроль трубопровода; спектр; диагностика; дефект трубопровода; сигналы вибрации.

Для цитирования: Политова Т.О., Загретдинов А.Р., Сидоров М.В., Зиганшин Ш.Г., Ваньков Ю.В. Методы машинного обучения в разработке методики обнаружения утечек // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 177-186. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-177-186.

MACHINE LEARNING METHODS IN THE DEVELOPMENT OF LEAK DETECTION TECHNIQUES

Politova T.O., Zagretdinov A.R., Sidorov , Ziganshin Sh.G., Vankov Yu.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

politovatatyana@yandex.ru

Abstract: The aim of the work is to explore the possibility of using artificial intelligence to find leak detection using training data obtained using vibroacoustic sensors. The paper describes methods of continuous monitoring. Methods of periodic monitoring of leak detection in the pipeline are presented. Testing work was carried out on the laboratory stand. Methods for machine learning are considered, namely boosting, k-nearest neighbors, random forest method, multi-layer neural network method. An algorithm has been developed for compiling data arrays. The results of the program are shown.

Keywords: leaks; pipeline; pipeline monitoring; spectrum; diagnostics; pipeline defect; vibration signals.

For citation: Politova T.O., Zagretdinov A.R., Sidorov , Ziganshin Sh.G., Vankov Yu.V. Machine learning methods in the development of leak detection techniques. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (2): 177-186. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-177-186.

Введение (Introduction)

Трубопроводы являются одним из важнейших элементов энергетических систем и комплексов. От их технического состояния зависит надежность энергоснабжения промышленных предприятий и коммунального сектора. Утечки в трубопроводных системах могут оставаться незамеченными в течение длительного периода времени и приводить к значительному экономическому ущербу, накоплению транспортируемых

продуктов в почве, грунтовых водах, что приводит к экологическим нарушениям.

В связи с высоким износом элементов трубопроводного транспорта, актуальными являются вопросы разработки методов мониторинга их технического состояния.

Системы обнаружения утечек в трубопроводе в последние годы приобретают все большую популярность. И это неслучайно, так как в самых различных отраслях промышленности и жилищно-коммунального хозяйства используются тысячи километров трубопроводов. Они предназначены для транспортировки различных видов продукта: водяного пара, воды, масла, газа, воздуха, мазута, имеют разную конфигурацию и диаметры. Расположение трубопроводов бывает, как наземное, так и подземное, доступ к ним чаще всего затруднен из-за прокладки трубопровода под слоем грунта, воды, или же доступ к ним может быть опасен для человека.

Для контроля трубопровода устанавливаются первичные датчики, а также исполнительные устройства защит, обеспечивающие безопасность персонала, трубопроводов и связанного с ними оборудования [5-6].

Системы контроля должны соответствовать следующим требованиям:

- высокий уровень чувствительности;
- эксплуатационная безопасность;
- исключение нарушения режима работы;
- требуемая точность определения места повреждения;
- обеспечение контроля протяженных трубопроводов;
- высокий уровень надежности, безопасности и автоматизации;
- экономичность;
- способность быть готовым к эксплуатации в любых климатических и погодных условиях.

Целью работы является исследование возможности использования искусственного интеллекта для разработки методики нахождения утечек.

Для обучения системы контроля использовались данные, полученные с виброакустических датчиков. Анализ сигналов проводился методами машинного обучения, а именно сравнивались результаты обработки бустингом, методом k-ближайших соседей, методом случайного леса, многослойной нейронной сетью.

Материалы и методы (Materials and methods)

По причине того, что размещение каких-либо устройств внутри трубы не допускается, так как эти устройства создают препятствие потоку продукта, наиболее функциональным является метод контроля использующий для обнаружения утечки шум перекачиваемого продукта. Метод основывается на установке датчиков вибрации на наружной поверхности трубопровода и использовании их для записи акустического сигнала, содержащего спектральные составляющие колебаний стенок трубопровода и перекачиваемого продукта, с анализом регистрируемых сигналов в компьютере [9-10]. Достоинством метода является отсутствие необходимости врезки в стенку трубы и устройств, мешающих течению продукта в трубе, что повышает эксплуатационную надежность и безопасность. Преимущество метода – простота конструкции и минимум технических средств для реализации способа.

Простота конструкции достигается тем, что на поверхности трубопровода, в котором требуется проводить измерения устанавливается только датчик вибрации. Обычно применяют пьезокерамические датчики. Буферный усилитель микросхемы, необходимый для адаптации датчика к линии связи, имеет низкое энергопотребление.

Другие устройства, которые являются частью измерительной схемы: полосовой фильтр, АЦП, анализатор спектра шумового сигнала (микропроцессорный), подключены к персональному компьютеру посредством линий связи через мультиплексор и находятся на стороне единственного системного компьютера, так как он покрывают всю сеть датчиков, которые устанавливаются по длине и трубопровода.

Работа устройства происходит следующим образом. Шум потока всегда содержит отдельные спектральные составляющие, которые обусловлены резонансными колебаниями оборудования. Шум потока перекачиваемого продукта создает вибрации стенки трубы с разными частотами и относительно равномерным спектром представленном на рисунке 1. Зависимость гармоник трубопровода от давления транспортируемого продукта может быть описана эмпирической формулой, например, в форме степенного полинома второго порядка.

В случае появления утечки, в спектре трубопровода появляются дополнительные гармоники (рис. 2), вызванные вытекающей струей жидкости через дефект стенки.

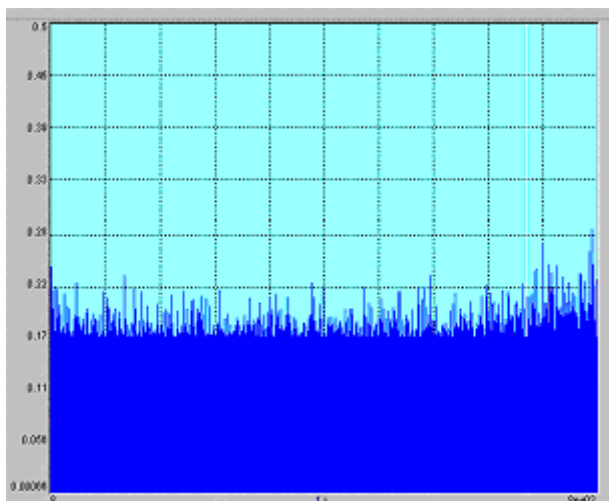


Рис.1. Спектр исправного трубопровода

Fig.1. The spectrum of a serviceable pipeline

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

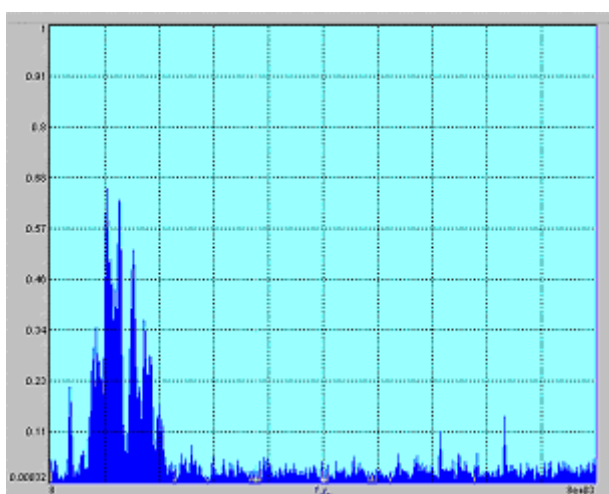


Рис. 2. Спектр трубопровода с дефектом

Fig. 2. The spectrum of the pipeline with a defect

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Датчики вибрации регистрируют вибрации трубы и передают их через буферный усилитель в линию связи. После фильтрации шумовой сигнал преобразуется в цифровую форму с помощью АЦП. С выхода АЦП сигнал поступает на вход анализатора спектра с высоким разрешением. Используя алгоритм быстрого преобразования Фурье, анализатор спектра извлекает гармоники колебаний трубопровода с наибольшей амплитудой и определяет точное значение их частоты [7].

Для получения экспериментальных данных необходимых для исследований, разработана экспериментальная установка, которая включает в себя:

- стальную трубу диаметром 0,159 м, толщина стенки 6,0 мм, длиной 2,0 м;
- обратный клапан;
- насос, создаваемый избыточное давление воды внутри трубы;
- манометр с классом точности 2,5 и пределом измерения давления 10,0 бар;
- персональный компьютер;
- аналого-цифровой преобразователь;
- согласующее устройство AG01-3 – специализированная аппаратура,

предназначенная для улучшения качества связи и повышения эффективности радиопередающих устройств.

Структурная схема и фотография экспериментальной установки представлены на рисунке 3.

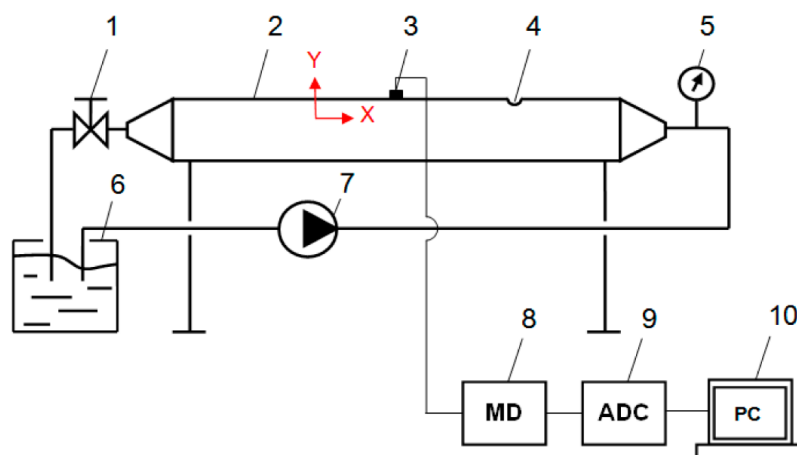


Рис. 3. Экспериментальное устройство: 1 - клапан; 2 - трубопровод; 3 - датчик виброускорения AR2038R; 4 - дефект; 5 - манометр; 6 - бак с водой; 7 - насос LEO XKJ - 900 I; 8 - согласующее устройство AG01-3; 9 - аналого-цифровой преобразователь NI USB-6229; 10 - компьютер

Fig. 3. Experimental device: 1 - valve; 2 - pipeline; 3 - vibration acceleration sensor AR2038R; 4 - defect; 5 - pressure gauge; 6 - water tank; 7 - pump LEO XKJ - 900 I; 8 - matching device AG01-3; 9 - analog-to-digital converter NI USB-6229; 10 - computer

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

В качестве моделей дефектов трубопроводов мы использовали диски с отверстиями разного диаметра (от 1 до 8 мм), показанные на рисунке 4. Диски были установлены и закреплены на фитинге, приваренном к трубе (рис. 5).



Рис.4. Диски симуляции дефекта отверстия разного диаметра

Fig.4. Disks simulating a hole defect of different diameters

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author



Рис. 5. Диск симуляции дефекта трещина

Fig. 5. Crack defect simulation disk

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author



Рис. 6. Способ крепления дисков на трубопроводе: (а) вид сбоку, (б) вид сверху Fig. 6. Method of mounting discs on the pipeline: (a) side view, (b) top view

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Акустические сигналы, возникающие в трубопроводе при движении по нему жидкости, регистрировались с внешней поверхности трубопровода трехкомпонентным вибропреобразователем AP2038P. Вибропреобразователь имеет следующие характеристики: осевая чувствительность 100,0 мВ/г; собственная частота 35,0 кГц; диапазон рабочих температур – 40 - 125°C. Преимуществом такого датчика является одновременное измерение сигнала в одной точке вибрации по разным координатным осям [10]. Это в свою очередь позволило определить какое направление сигнала более подробно и точно описывает состояние сигнала.

Сигнал, принимаемый преобразователем вибрации, преобразуется из аналогового сигнала в цифровой код в АЦП-ЦАП NI USB-6229 (частота оцифровки сигналов составляет 250 кГц; разрешение АЦП составляет 16 бит) и анализируется в персональном компьютере.

В ходе экспериментов получены сигналы вибрации бездефектного трубопровода и с различными дефектами при прохождении по нему воды под давлением от 2 до 3,5 бар. Данные, полученные в ходе экспериментов, позволили обнаружить закономерности, графическое представление которых показано на рис. 7 и 8. В дальнейшем из полученных данных формировались массивы для машинного обучения

Результаты (Results)

Для распознавания и классификации дефектов трубопроводов по их акустическим сигналам предлагается использовать алгоритмы машинного обучения. Машинное обучение в настоящее время становится одним из самых популярных методов упрощения процессов работы человека.

Для решения задачи в качестве основ были выбраны:

1) метод градиентного бустинга. Это ансамблевый метод, который последовательно строит слабые модели (часто деревья решений), где каждая последующая модель корректирует ошибки предыдущих. Обучение происходит итеративно, минимизируя функцию потерь с помощью градиентного спуска. Результат — сильная модель, обладающая высокой точностью.

2) метод k-ближайших соседей. Это метод непараметрического классификации и регрессии. Для классификации нового объекта он находит k ближайших к нему объектов в обучающей выборке и присваивает ему класс, наиболее распространенный среди этих k соседей. Для регрессии вычисляется среднее значение целевой переменной у k ближайших соседей. Выбор параметра k важен для производительности метода.

3) метод случайного леса. Это ещё один ансамблевый метод, который строит множество деревьев решений на случайных подвыборках данных и случайных подмножествах признаков. Предсказание делается путем усреднения (для регрессии) или голосования (для классификации) результатов отдельных деревьев. Обладает высокой точностью и устойчивостью к переобучению.

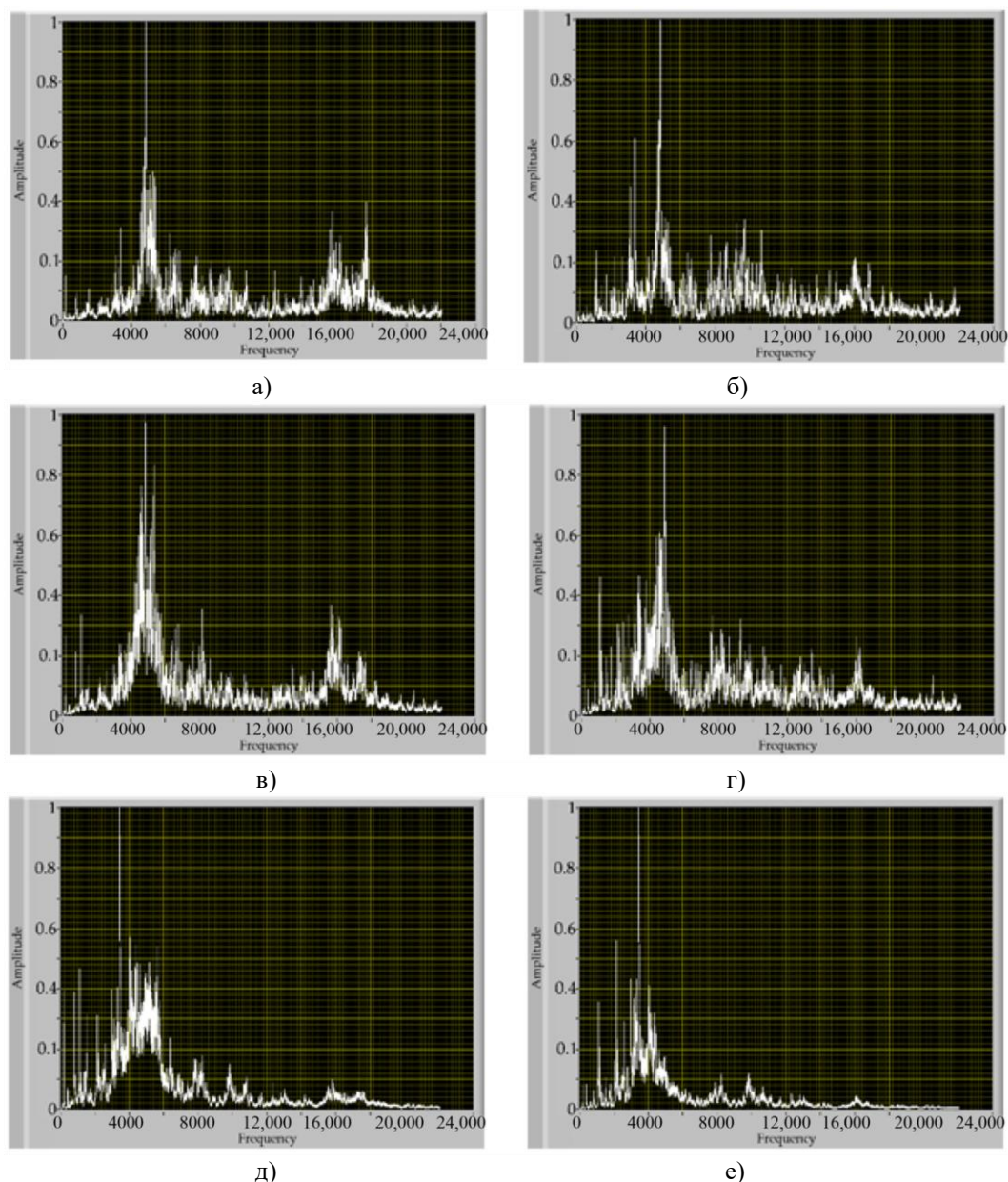
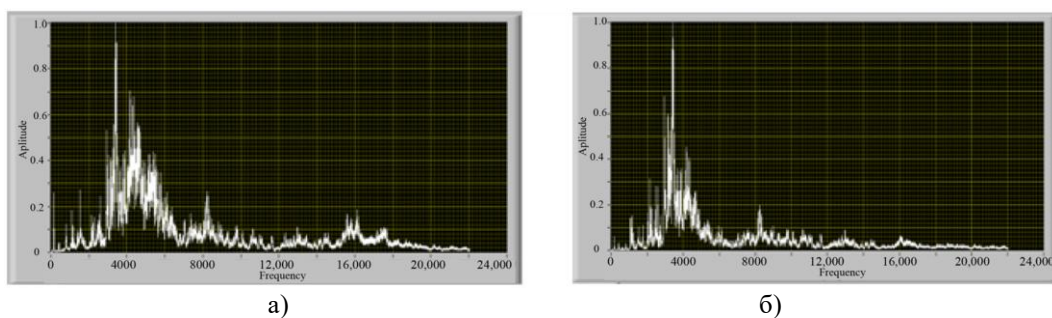


Рис. 7. Спектры колебаний бездефектного трубопровода: (а) сигнал (кГц) по оси X при давлении 4 атм; (б) сигнал по оси Y при давлении 4 атм; (в) сигнал по оси X при давлении 3 атм; (г) сигнал по оси Y при давлении 3 атм; (д) сигнал по оси X при давлении 2 атм; (е) сигнал по оси Y при давлении 2 атм

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Fig 7. Vibration spectra of a defect-free pipeline: (a) signal (kHz) on the X-axis at a pressure of 4 atm; (b) signal on the Y-axis at a pressure of 4 atm; (c) signal on the X-axis at a pressure of 3 atm; (d) signal on the Y-axis at a pressure of 3 atm; (e) the signal is along the X-axis at a pressure of 2 atm; (e) the signal is along the Y-axis at a pressure of 2 atm



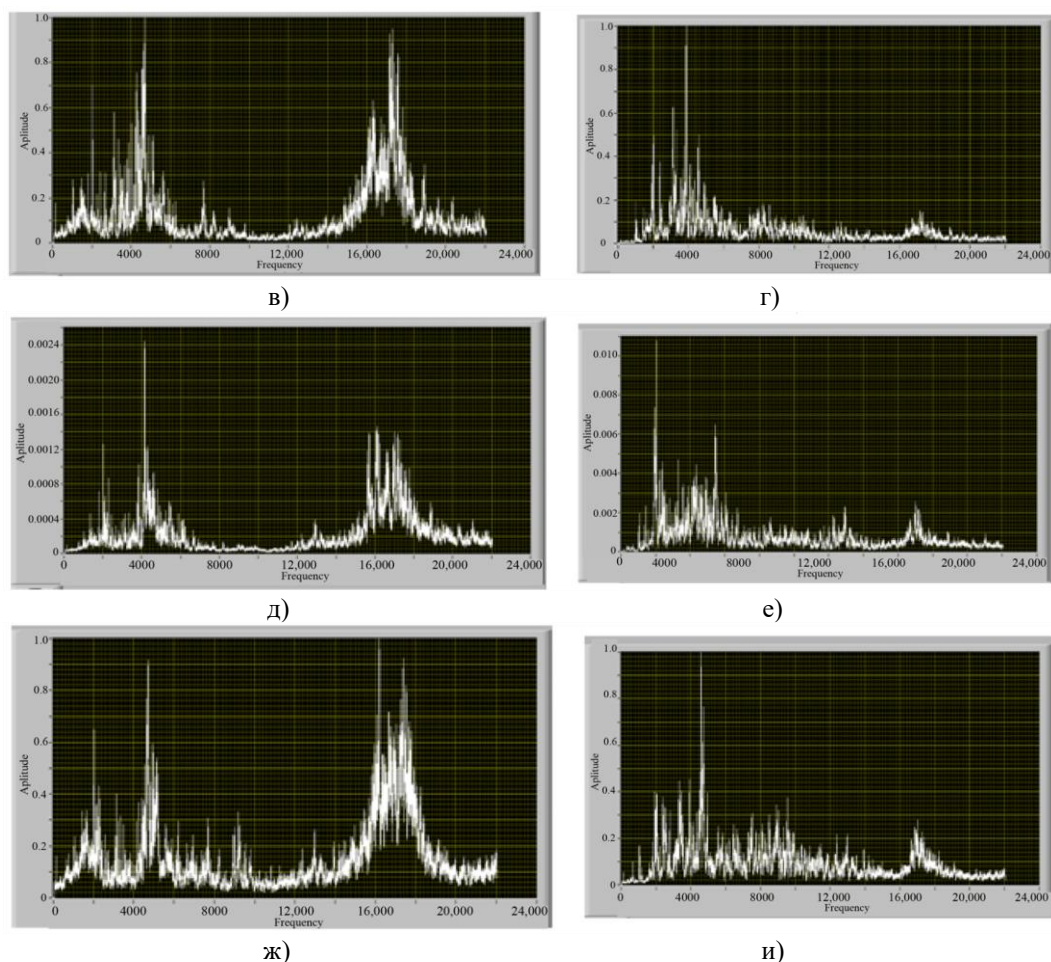


Рис. 8. Частотные спектры трубопроводов с дефектами (при давлении 3 атм): (а) сигнал (кГц) по оси X бездефектных насосно-компрессорных труб; (б) сигнал по оси Y бездефектных насосно-компрессорных труб; (в) сигнал по оси X трубопровода с диаметром отверстия 1 мм; (г) сигнал по оси Y трубопровода с диаметром отверстия 1 мм; (д) сигнал по оси X трубопровода с диаметром отверстия 3 мм; (е) сигнал на оси Y трубопровода с диаметром отверстия 3 мм; (ж) сигнал на оси X трубопровода с типом дефекта «трещина»; (и) сигнал на оси Y трубопровода с типом дефекта «трещина»

Fig. 8. Frequency spectra of pipelines with defects (at a pressure of 3 atm): (a) Signal (kHz) on the X-axis of defect-free tubing; (b) the Y-axis signal of defect-free tubing; (c) signal on the X-axis of a pipeline with a hole diameter of 1 mm; (d) signal on the Y-axis of a pipeline with a hole diameter of 1 mm; (e) signal on the X-axis of a pipeline with a hole diameter of 3 mm; (f) signal on the Y-axis of a pipeline with a hole diameter of 3 mm; (g) the signal on the X-axis of the pipeline with the type of defect "crack"; (i) the signal on the Y-axis of the pipeline with the type of defect "crack"

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

4) метод многослойной нейронной сети. Это модель, состоящая из множества взаимосвязанных нейронов, организованных в слои (входной, скрытые и выходной). Каждый нейрон выполняет взвешенную сумму своих входных сигналов, применяет к ней активационную функцию и передает результат на следующий слой. Обучение происходит путем минимизации функции потерь с помощью алгоритмов обратного распространения ошибки. Сеть способна моделировать сложные нелинейные зависимости, но требует больших объемов данных и вычислительных ресурсов для эффективного обучения.

Обсуждение (Discussions)

Обучающие датафреймы модели машинного обучения

Результаты работы стенда формировались в файлах с расширением txt, с содержанием значений в количестве 80000. Для упрощения рутинного ручного форматирования рабочих массивов в формат Excel, было решено воспользоваться встроенным софтом VBA (Visual Basic for Applications). В результате получился обучающий файл Excel содержащий распределенные по листам значения. Таким-же

образом формировались остальные массивы (бездефектный трубопровод, дефект 1, дефект 2), содержащие в себе отличные друг от друга по содержанию данные.

Результаты работы кода

Результаты которой приведены в таблице.

Таблица
Table

Сводная таблица результатов
Summary table of results

Наименование метода машинного обучения	Среднее время обучения, сек.	Бездефектный трубопровод		Трубопровод – дефект трещина		Трубопровод – дефект отверстие	
		Отношение верно предсказанного класса к общему числу опытов, %	Средняя точность предсказания класса, %	Отношение верно предсказанного класса к общему числу опытов, %	Средняя точность предсказания класса, %	Отношение верно предсказанного класса к общему числу опытов, %	Средняя точность предсказания класса, %
Градиентный бустинг	10981	5	40	38	62	40	61
k – ближайших соседей	0,7	98	100	0	0	100	100
Случайный лес	22	10	48	0	0	8	40
Многослойная нейронная сеть	85	60	86	3	98	95	93

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Заключение или Выводы (Conclusions)

Использование искусственного интеллекта для обнаружения течи трубопровода по анализу акустических сигналов возможно. Этому свидетельствует высокий процент верно определенного класса неисправности и высокий процент точности.

Самым подходящим является метод k-ближайших соседей, имеющий точность свыше 98 процентов, а наименее точным показал себя метод случайного леса, с общим количеством верных предсказаний класса 10 %. Данный метод быстро обучается, несмотря на огромный массив из 7 миллионов значений.

Многослойная нейронная сеть немного уступает k-ближайшему в точности, повысить ее возможно путем увеличения числа скрытых нейронов, но это значительно увеличивает время обучения, и достаточно сильно загружает как центральный процессор, так и забивает оперативную память, от чего становится невозможным пользование компьютером.

Что касается остальных методов, бустинг является самым долгим в обучении, около трех часов. Связано это с множеством значений в массиве, но их множество не позволило методу точно предсказывать класс тестового массива. Точность прогнозирования составила в среднем 5 процентов, что является недопустимым.

Случайный лес имеет оптимальное время обучения, в среднем это 22 секунды. Но общая точность прогноза составляет всего 10 процентов. Данным методом невозможно точно спрогнозировать состояние трубопровода, так как даже при отсутствии дефектов, метод присваивал тестовому массиву класс - дефекты.

Метод многослойной нейронной модели показал хорошие результаты, как в скорости обучения (около 1,5 минуты), так и в точности прогнозирования принадлежности классов (в среднем 60 %). Точность возможно повысить на 5-10 процентов путем увеличения числа скрытых слоев до двух тысяч, но появляются значительные недостатки: увеличивается скорость обучения, что составляет около получаса; сильно забивает оперативную память компьютера, из-за чего становится невозможность его использования. В результате имея практически такую-же точность в

прогнозировании, как и метод k-ближайших соседей, данный метод уступает в скорости обучения, и в степени загруженности центрального процессора.

На основании экспериментальных данных, ориентируясь на точность прогноза и легкости в использовании, самым подходящим методом машинного обучения для мониторинга состояния трубопровода стал метод k-ближайших соседей.

Литература

1. Doklad o Sostoyanii Sfery Teploenergetiki i Teplosnabzheniya v Rossijskoj Federacii [Report on the State of Heat Power and Heat Supply in the Russian Federation]. Available online: <https://minenergo.gov.ru/viewpdf/10850/80685> (accessed on 20 January 2020).
2. Авдюнин Е.Г. Источники и системы теплоснабжения. Тепловые сети и тепловые пункты. – Москва; вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 300с.
3. Assessment of the condition of pipelines using convolutional neural networks / Y. Vankov, S. Ziganshin, T. Politova [et al.] // Energies. – 2020. – Vol. 13, No. 3. – P. 618.
4. Марченко А.Л. Python: большая книга примеров / А.Л. Марченко. – Москва: Издательство Московского университета, 2023. – 361, с.
5. Павлов А.Н., Сосновцева О.В., Зиганшин А.Р. Мультифрактальный анализ хаотической динамики взаимодействующих систем // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2003. Т. 11, № 2. С. 39-54.
6. Ключев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник. М.: Машиностроение, 2005. 656 с.
7. Safronchik, V.I. Zashchita Podzemnyh Truboprovodov Antikorrozionnymi Pokrytiyami [Protection of Underground Pipelines with Anti-Corrosion Coatings]; Stroyizdat: Leningrad, Russia, 1977. (In Russian)
8. Сурис М.А., Липовских В.М. Защита трубопроводов тепловых сетей от наружной коррозии. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 216 с.
9. Анализ масштабной инвариантности виброакустических сигналов трубопровода с утечками / А.Р. Загретдинов [и др.] // СП6НТОРЭС: труды ежегодной НТК. 2023. № 1 (78). С. 88-90.
10. Detrended fluctuation analysis based on best-fit polynomial / Shanshan Zhao [et al.] // Enviromental science. 2022. № 10. С. 1-7.
11. Павлов А.Н., Павлова О.Н., Короновский А.А. Мл. Модифицированный метод флуктуационного анализа нестационарных процессов // Письма в Журнал технической физики. 2020. Т. 46, № 6. С. 47-50.
12. Gaponenko S.O., Kondratiev A.E., Zagretidinov A.R. Low-frequency Vibro-acoustic Method of Determination of the Location of the Hidden Canals and Pipelines. // Proc. 2nd International Conference on Industrial Engineering. Chelyabinsk, 2016. Pp. 2321-2326.
13. G. Loizou and S. J. Maybank, "The nearest neighbor and the bayes error rates," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intel., Vol. 9, pp. 254-62, Feb. 1987.
14. Метод K-ближайших соседей (KNN). [Электронный ресурс] // Хабр URL: <https://habr.com/ru/articles/801885/>: (Дата обращения 07.05.2024).
15. A comparison of random forest based algorithms: random credal random forest versus oblique random forest / C. J. Mantas, Ja. G. Castellano, S. Moral-García, J. Abellán // Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications. – 2019. – Vol. 23, No. 21. – P. 10739-10754.

Авторы публикации

Политова Татьяна Олеговна –ст.препод. кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ)Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *Email* politovatatyana@yandex.ru

Загретдинов Айрат Рифкатович – канд. техн. наук доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ)Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Сидоров Михаил Валерьевич– магистр кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Зиганишин Шамиль Гаязович – канд. техн. наук доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Ваньков Юрий Витальевич–д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Report on the state of the sphere of heat power engineering and heat supply in the Russian Federation [Electronic resource]. Available online: <https://minenergo.gov.ru/viewpdf/10850/80685> (accessed January 20, 2020).
2. Avdyunin E.G. Sources and heat supply systems. Heating networks and heating points. – Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2019. 300c.
3. Assessment of the condition of pipelines using convolutional neural networks / Yu. Vankov, S. Ziganshin, T. Politova [et al.] // Energy. – 2020. – Volume 13, No. 3. – p. 618.
4. Marchenko, A.L. Python: a big book of examples / A.L. Marchenko. Moscow: Moscow University Press, 2023. 361, p.
5. Pavlov A.N., Sosnovtseva O.V., Ziganshin A.R. Multifractal analysis of chaotic dynamics of interacting systems // Izvestiya vuzov. Applied nonlinear dynamics. 2003. Vol. 11, No. 2. pp. 39-54.
6. Klyuev V.V., Sosnin F.R., Kovalev A.V. Non-destructive testing and diagnostics: handbook. Moscow: Mashinostroenie, 2005. 656 p.
7. Safronchik, V.I. Protection of underground pipelines with anti-corrosion coatings / V.I. Safronchik; Stroyizdat: Leningrad, Russia, 1977. (In Russian)
8. Suris M.A., Lipovskikh V.M. Protection of pipelines of thermal networks from external corrosion. Moscow: Energoatomizdat, 2003. 216 p
9. Analysis of the scale invariance of vibroacoustic signals of a pipeline with leaks / A.R. Zagretidinov [et al.] // SPbNTORES: proceedings of the annual NTC. 2023. № 1 (78). Pp. 88-90.
10. Analysis of fluctuations with trend deviation based on the best fit polynomial / Shanshan Zhao [et al.] // Environmental Science. 2022. No. 10. pp. 1-7.
11. Pavlov A.N., Pavlova O.N., Koronovsky A.A. Jr. A modified method of fluctuation analysis of unsteady processes // Letters to the Journal of Technical Physics. 2020. Vol. 46, No. 6. pp. 47-50.
12. Gaponenko S.O., Kondratiev A.E., Zagretidinov A.R. Low-frequency vibroacoustic method for determining the location of hidden channels and pipelines. // Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering. Chelyabinsk, 2016. pp. 2321-2326.
13. G. Loizu and S. J. Maybank, "Nearest Neighbor and Bayesian error Coefficient", IEEE translation. Pattern analysis. Max. Intel., Volume 9, pp. 254-62, February 1987.
14. The K-role Game Method (KNN).[Electronic resource]// URL: <url>
<https://habr.com/ru/articles/801885/> : (Accessed 05/07/2024).
15. Comparison of algorithms based on random forests: credal random forest random forest and oblique random forest random forest / K. J. Mantas, J. G. Castellano, S. Moral-Garcia, H. Abellan // Software computing - a combination of fundamentals, methodologies and applications. – 2019. – Volume 23, No. 21. – Pp. 10739-10754.

Authors of the publication

Tatiana O. Politova– Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Airat R. Zagretidinov– Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Mikhail V. Sidorov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Shamil G. Ziganshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

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

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено 14.02.2025 г.

Отредактировано 28.02.2025 г.

Принято 01.03.2025 г.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 622.276.6

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-2-187-196

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВНУТРИСКВАЖИННОГО РЕАКТОРА ДЛЯ ДОБЫЧИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ

Дмитриев А.В.¹, Шагеев А.Ф.², Гильмутдинова Р.И.¹

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия
ieremiada@gmail.com, shageevalbert@rambler.ru, gilmutdinovarezeda@mail.ru

Резюме: Проблема добычи высоковязкой нефти становится все более актуальной из-за истощения традиционных запасов углеводородов. В этой работе оценивается влияние различных параметров внутрискважинного реактора, который играет важную роль в технологии добычи высоковязкой нефти. Особое внимание уделяется длине цилиндрического нагревателя, плотности теплового потока, скорости фильтрации и радиусу нагревателя. В результате получена формула для расчета оптимальной длины нагревателя, зависящая от определенных параметров реактора. **ЦЕЛЬ.** Исследовать и определить ключевые параметры, такие как длина цилиндрического нагревателя, скорость фильтрации, радиус цилиндрического нагревателя. Получить формулу, которая позволит точно рассчитать оптимальную длину цилиндрического нагревателя. **МЕТОДЫ.** Исследование теоретических аспектов, основанное на физических законах, которые описывают процессы теплообмена, а также на теплофизических свойствах высоковязкой нефти. Сравнение различных параметров цилиндрического нагревателя для определения оптимальной длины. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В процессе исследований были установлены соотношения между величиной x , м, для возможности создания реактора с наилучшими характеристиками при различных значениях плотности теплового потока, скорости фильтрации, радиуса цилиндрического нагревателя. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Исследования показали, что длина цилиндрического нагревателя в реакторе зависит от радиуса нагревателя, линейной плотности теплового потока и скорости фильтрации. При значениях плотности теплового потока 1000 Дж/(м²·с), 1250 Дж/(м²·с), 1500 Дж/(м²·с) длина цилиндрического нагревателя при различных значениях потери плотности теплового потока принимает значения в диапазоне от 0,94 м до 2 м; при постоянных потерях плотности теплового потока – от 0,66 м до 3,3 м; Обнаружено, что при увеличении теплового потока длина цилиндрического нагревателя уменьшается в 2 раза, а при увеличении скорости фильтрации – увеличивается в 1,2 раза. При разных значениях радиуса цилиндрического нагревателя его длина остаётся неизменной, так как разница в длине незначительна.

Ключевые слова: плотность теплового потока; скорость фильтрации; длина цилиндрического нагревателя; высоковязкая нефть; внутрискважинный реактор.

Для цитирования: Дмитриев А.В., Шагеев А.Ф., Гильмутдинова Р.И. Оценка параметров внутрискважинного реактора для добычи высоковязкой нефти // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 187-196. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-187-196.

EVALUATION OF DOWNHOLE REACTOR PARAMETERS FOR HIGH VISCOSITY OIL PRODUCTION

Dmitriev A.V.¹, Shageev A.F.², Gilmutdinova R.I.¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia
ieremiada@gmail.com, shageevalbert@rambler.ru, gilmutdinovarezeda@mail.ru

Abstract: The problem of high-viscosity oil production is becoming more urgent due to the depletion of traditional hydrocarbon reserves. This work evaluates the influence of various parameters of the downhole reactor, which plays an important role in the technology of extraction of high-viscosity oil. Special attention is paid to the length of the cylindrical heater, the heat flux density, the filtration rate and the radius of the heater. As a result, a formula was obtained for calculating the optimal length of the heater, depending on certain reactor parameters. **PURPOSE.** To investigate and determine key parameters such as the length of the cylindrical heater, the filtration rate, and the radius of the cylindrical heater. To obtain a formula that will accurately calculate the optimal length of a cylindrical heater. **METHODS.** The study of theoretical aspects based on the physical laws that describe the processes of heat transfer, as well as on the thermophysical properties of high-viscosity oil. Comparison of various parameters of a cylindrical heater to determine the optimal length. **results.** In the course of the research, the relationships between the value x , m were established for the possibility of creating a reactor with the best characteristics at different values of heat flux density, filtration rate, radius of the cylindrical heater **CONCLUSION.** Studies have shown that the length of a cylindrical heater in a reactor depends on the radius of the heater, the linear density of the heat flow and the filtration rate. At heat flux densities of $1000 \text{ J/(m}^2\cdot\text{s)}$, $1250 \text{ J/(m}^2\cdot\text{s)}$, $1500 \text{ J/(m}^2\cdot\text{s)}$, the length of the cylindrical heater at various values of heat flux density loss takes values in the range from 0.94 m to 2 m; at constant heat flux density losses – from 0.66 m to 3.3 m; It was found that as the heat flow increases, the length of the cylindrical heater decreases by 2 times, and as the filtration rate increases, it increases by 1.2 times. At different values of the radius of the cylindrical heater, its length remains unchanged, since the difference in length is insignificant.

Keywords: heat flow density; filtration rate; length of cylindrical heater; highly viscous oil; downhole reactor.

For citation: Dmitriev A.V., Shageev A.F., Gilmutdinova R.I. Evaluation of downhole reactor parameters for high viscosity oil production. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (2): 187-196. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-187-196.

Введение (Introduction)

Добыча нефтяных ископаемых является актуальной задачей на сегодняшний день. Многие месторождения нефти исследованы, а для добычи высоковязкой нефти требуются большие затраты, как финансовые, так и эксплуатационные.

В связи со сложностью добычи нефти нефтедобывающим компаниям приходится искать разные пути для решения данной проблемы. Во многих научных работах рассмотрены разные методы увеличения эффективности добычи нефти. Для повышения эффективности добычи нефти авторами в статье [1] представлен метод, применимый в горизонтальных или наклонно-направленных скважинах, которые выполняют сразу несколько функций: добычу и закачку. Суть метода заключается в использовании бинарного раствора, который создаётся в результате экзотермической реакции между широкой фракцией лёгких углеводородов, для прогрева пласта. В результате применения специальных тепловых методов активации, появляется возможность контролировать время начала реакции после начала закачки бинарного раствора. Благодаря использованию теплового способа разогрева при снижении дебита и повторной закачке бинарного раствора, повышается нефтеотдача. Также, за счёт отсутствия в составе бинарного раствора активатора, можно отложить начало химического воздействия на призабойную зону на нужный срок, не опасаясь преждевременной активации химической реакции. Кроме того, применение теплового способа разогрева позволяет запустить цепную реакцию теплопередачи для последовательного прогрева всего пласта.

Рассмотрены также механизированные способы, направленные на снижение экономических затрат при добыче нефти. Эти способы включают в себя оптимизацию оборудования и поиск альтернативных решений. Одним из предлагаемых способов решения является процесс увеличения глубины существующих скважин для достижения более продуктивных слоев и внедрение установки бесштангового плунжерного насоса, как энергоэффективного метода добычи нефти механизированным способом [2]. Также в статье упоминается, что для повышения эффективности использования электроэнергии при добыче нефти можно применять внутрискважинные компенсаторы реактивной мощности.

Один из методов добычи нефти предполагает использование системы вертикальных и горизонтальных скважин, через которые под давлением закачивается специальный раствор. Этот раствор содержит компоненты, которые способствуют гидроразрыву пласта и помогают вытеснить нефть. Для повышения эффективности процесса добычи на первом подготовительном этапе в качестве агента в продуктивный пласт под повышенным давлением подают трёхфазную смесь, состоящую из водогазовой эмульсии, повышающий коэффициент нефтеотдачи [3]. Также как метод интенсификации извлечения нефти применяют волновые методы [4], которые оказывают воздействие на продуктивные пласты и при комплексном взаимодействии достигается уменьшение вязкости пластовых жидкостей путём закачки пара и увеличение проницаемости пористого материала.

В статье [5] исследуется ультразвуковая установка для повышения нефтеотдачи пластов. Суть установки заключается в использовании ультразвуковых волн для обработки пластов в водонагнетательных и нефтяных скважинах с целью улучшения условий циркуляции и проницаемости, а также увеличения добычи нефти, скорости закачки воды и нефтеотдачи пластов. Преимущества ультразвуковой добычи нефти включают отсутствие загрязнения и повреждения пласта.

Среди различных методов термического извлечения преобладающей технологией является инъекция пара, которая включает паровую стимуляцию, паровое затопление и гибридную технологию затопления или дренажа [6]. В этом способе тепло передаётся от пара к вязкой нефти, которая находится в пластах. Передача тепла происходит за счёт теплопроводности и конвекции. Это позволяет снизить вязкость нефти, сделать её более подвижной и, как следствие, повысить коэффициент извлечения нефти.

В исследовании [7], проведённом авторами, был рассмотрен метод повышения производительности скважин, эксплуатирующих высоковязкую нефть, основанный на применении термогазохимического воздействия на пласт в системе, состоящей из двух скважин: одна – для нагрева пласта, и вторая – для добычи нефти. В процессе термохимической реакции, происходящей при нагреве пласта, образуются газы, которые способствуют снижению вязкости пластовой жидкости. По завершении термообработки нагрев пласта прекращается, и начинается процесс добычи нефти с использованием насосного оборудования.

В процессе добычи нефти используются различные технологии, включая применение катализаторов и наноматериалов. Так в статье [8] разработана инновационная наножидкость, которая помогает эффективно извлекать тяжёлую нефть непосредственно на месте добычи, повышая её качество для последующей переработки и производства топлива. Это позволяет увеличить нефтеотдачу пластов и показатели качества топлива. Лабораторные испытания показали, что наножидкость способна снижать вязкость нефти, улучшать подвижность нефти и избирательно взаимодействовать с тяжёлыми нефтяными фракциями, такими как смолы и асфальтены.

В статье [9] рассматривается применение газового метода повышения нефтеотдачи пластов. Суть метода заключалась в закачке соляной кислоты в скважины. В ходе этого процесса происходит выделение углекислого газа. Образовавшийся объём диоксида углерода способствует расширению зоны охвата пласта и выступает в качестве эффективного вытесняющего агента. Исследования показали, что закачка соляной кислоты способствовала очистке призабойной зоны в рассматриваемых скважинах. В результате увеличилась способность пластовой зоны поглощать жидкость и увеличился объём закачиваемой воды в нагнетательные скважины.

В работе [10] авторы предложили экспериментальную систему визуализации, которая позволила исследовать процессы, происходящие при комбинированном термическом заводнении и способствующие улучшению текучести тяжёлой нефти. В процессе применялись разнообразные способы нагнетания: закачка пара, термохимическая закачка, термогазовая закачка, парогазовая закачка и комбинированная закачка с использованием горячего реагента и газа. Измерив вязкость нефти при различных температурных режимах, было выявлено, что при повышении температуры вязкость нефти снижается, что делает нефть более текучей. Заводнение с использованием горячего CO_2 менее эффективно, чем заводнение паром. Это связано с тем, что давление в пласте не позволяет CO_2 эффективно снижать вязкость нефти.

Тем не менее, неконтролируемая закачка воды со временем приводит к быстрому росту доли воды в добываемой нефти. Это одна из причин, по которой на многих нефтяных месторождениях доля воды в добыче превышает 90%. Помимо этого, закачка воды может вызвать засорение нагнетательной скважины. Это происходит из-за того, что

на дне скважины накапливаются песок и другие мелкие частицы, которые забивают поры. В связи с этим, в работе [11] предложено альтернативное решение данной проблемы, которая предполагает повышение нефтеотдачи путем закачки воды с низкой солёностью. Суть метода заключается в введении воды, солёность которой ниже, чем у пластовой, так как солёность оказывает значительное влияние на закачку нефти. Также применение в этой области нашли поверхностно-активные вещества, которые служат для удаления остатков нефти в пласте. При использовании закачки воды с низкой солёностью в сочетании с добавлением поверхностно-активных веществ процесс извлечения оставшейся нефти, которая прилипла к порам породы, может стать более эффективным. Результаты этого исследования показали, что чем меньше скорость закачки поверхностно-активного вещества, тем выше нефтеотдача.

В связи с тем, что температура нефти снижается из-за теплообмена с окружающей средой и увеличивается ее вязкость, возникает необходимость затрачивать большое количество энергии на работу насосов. Важно точно рассчитать температуру охлаждения нефти для определения безопасной продолжительности остановки и критического температурного порога. В статье [12] авторами определена методология расчета безопасного времени остановки трубопровода для высоковязкой нефти. В ходе исследования были проведены вычисления охлаждения нефти в трубопроводе в двух условиях: при непрерывной транспортировке и при остановке. В первом случае наблюдалась динамика снижения температуры, во втором – анализировалась передача тепла при нормальной работе и при временных остановках. Эти вычисления предоставили ценную информацию о передаче тепла в трубопроводе, помогли оптимизировать его работу и определить безопасное время остановок для предотвращения повышения вязкости нефти и проблем с потоком.

В исследовании [13] были найдены численные и аналитические решения задачи по извлечению высоковязкой нефти из скважины с применением термического воздействия. Авторы предложили расчётную схему разработки нефтяного пласта, которая позволила повысить эффективность добычи высоковязкой нефти за счёт равномерного прогрева зоны месторождения. Предложена модель добычи нефти с использованием одной скважины вместо двух.

В работе [14] исследуется метод переработки залежей сланцевой нефти, который включает три способа преобразования: электрический нагрев ствола скважины, низкочастотный электрический нагрев и нагрев нагнетанием пара, с использованием численного моделирования для оценки эффективности нагрева, крекинга и добычи жидкости. Электрическая закачка обеспечивает лучшую скорость и объем нагрева, а закачка пара защищает скважину от пиковых температур. Нагрев ствола скважины и низкочастотный электрический нагрев повышают среднюю температуру пласта, усиливая превращение керогена в тяжелую нефть, но могут привести к крекингу. Паровой нагрев снижает скорость крекинга, способствуя добыче более тяжелой нефти. Скважинный и низкочастотный электрический нагревы выделяют меньше воды, в отличие от парового, который вводит значительное количество воды, снижая работоспособность резервуара и усложняя производство воды, что препятствует преобразованию и извлечению углеводородов. Скважинный и низкочастотный электрический нагревы схожи по возможностям нагрева пласта и добычи жидкости, но низкочастотный нагрев обеспечивает более равномерное распределение тепла и снижает максимальные температуры в стволе скважины, улучшая трещинообразование и увеличивая добычу жидкости, особенно в части световой отдачи нефти.

В данной работе основное внимание уделяется исследованию оптимальной длины цилиндрического нагревателя, который используется в внутрискважинном реакторе (рис. 1). Этот аспект является ключевым для разработки технологии, способной эффективно разжигать высоковязкую нефть, что в свою очередь значительно повышает эффективность добычи.

Материалы и методы (Materials and methods)

В исследовании рассматривается цилиндрический нагреватель (трубчатый электронагреватель), который вводится в реактор, заполненный пористым слоем.

Заданы следующие параметры: r_0 – радиус стрежня, м, r_b – радиус цилиндрической части, м, q_{l0} – линейная плотность теплового потока, Дж/(м²·с), задана скорость фильтрации w , м/с, d – параметр, показывающий соотношение плотностей теплового потока. Теплопроводность λ данной среды приняли постоянной и равной 0,814 Вт/(м·К), коэффициент температуропроводности a приняли равным $9,7 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

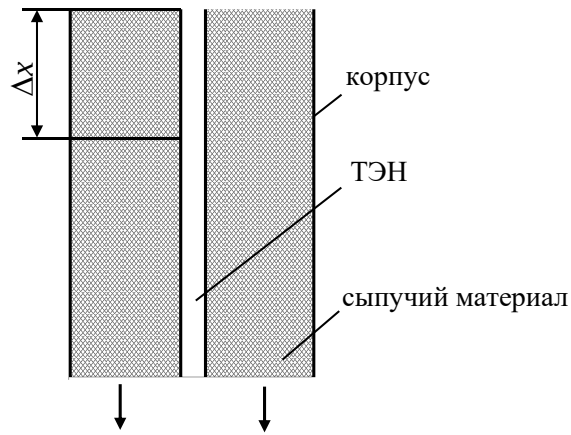


Рис. 1. Модель внутрискважинного реактора

Fig. 1. Downhole reactor model

*Источник: [15] Source: [15].

В ходе предыдущих исследований [16] были установлены закономерности для безразмерных параметров вышеописанных величин. На основе этих исследований была разработана математическая модель для расчёта температурного поля в кольцевом пористом слое. В результате было получено уравнение, которое позволяет определить распределение температуры в пористом цилиндрическом слое при условии бесконечного нагрева и отвода тепла (1).

$$T(X, Z) = \frac{1}{4\pi(B-1)} (X + Z - 1 - B \ln Z). \quad (1)$$

Зависимость безразмерной температуры от теплопроводности и плотности теплового потока:

$$T = \frac{(t - t_0) \lambda^*}{q_{l0}}. \quad (2)$$

Для оценки реальных размеров исследуемого устройства проведем расчет, задав конкретные параметры. На основе безразмерных параметров была получена формула, в которую впоследствии подставлялись различные параметры реактора, после чего варьировались значения плотности теплового потока, скорости фильтрации и длины цилиндрического нагревателя.

Рассмотрим частный случай при $Z=1$, формула 1 имеет вид:

$$T(X, Z) = \frac{1}{4\pi(B-1)} X, \quad (3)$$

где $X = \frac{4\alpha x}{w r_0^2}$, $B = \frac{q_{l0} r_b^2 - q_{lb} r_0^2}{(q_{l0} - q_{lb}) r_0^2}$.

Конечная формула для расчета длины цилиндрического нагревателя:

$$x = \frac{\pi w (t - t_0) \lambda (r_b^2 - r_0^2)}{\alpha q_{l0} (1 - d)}, \quad (4)$$

где d – соотношению плотностей линейного потока, t – температура самовоспламенения сыпучего материала, °C, t_0 – температура окружающей среды, °C.

Преобразованная формула показывает обратно пропорциональную зависимость длины стрежня от плотности теплового потока.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Оптимальная длина цилиндрического нагревателя способствует оптимизации производственных и монтажных расходов. Кроме того, это позволяет сократить эксплуатационные затраты, поскольку уменьшает потребность в дополнительном энергопотреблении для нагрева.

В процессе исследований были установлены соотношения между величиной x , м, для возможности создания реактора с наилучшими характеристиками. В исследовании при различных значениях плотности теплового потока q_{l0} , Дж/(м²·с), скорости фильтрации w , м/с, радиуса цилиндрического нагревателя r_0 , м, были получены зависимости, описывающие более подходящие параметры для конструирования реактора. В начале исследования были установлены следующие параметры: плотность теплового

потока $q_{l0} = 1250 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, радиус цилиндрического нагревателя $r_0 = 0,0075 \text{ м}$, скорость фильтрации $w = 0,1 \text{ м/с}$.

На рисунке 2 представлена зависимость длины цилиндрического нагревателя от изменения потери теплового потока через стенку d при различных значениях плотности теплового потока q_{l0} . Установлено, что с увеличением теплового потока уменьшается длина цилиндрического нагревателя. При плотности теплового потока $1000 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ длина цилиндрического нагревателя принимает значения от 1,4 м до 2 м, при $q_{l0}=1250 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ длина цилиндрического нагревателя достигает пределов от 1,12 м до 1,6 м, при $q_{l0}=1500 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ длина цилиндрического нагревателя уменьшается от 0,94 м до 1,34 м при потерях теплового потока от 0 до 0,3.

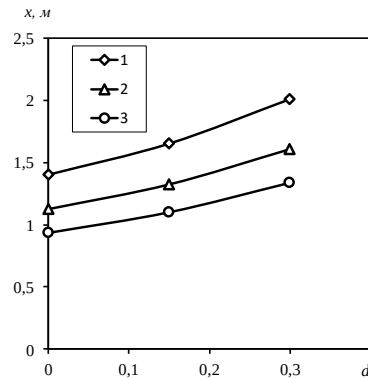


Рис. 2. Зависимость длины цилиндрического нагревателя от изменения потери теплового потока через стенку при различных значениях плотности теплового потока q_{l0} , $\text{Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$: 1 – 1000; 2 – 1250; 3 – 1500

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

В ходе исследования было обнаружено, что при разных значениях радиуса цилиндрического нагревателя r_0 его длина остаётся неизменной, поскольку разница в длине цилиндрического нагревателя незначительна.

На рисунке 3 представлена зависимость длины цилиндрического нагревателя от изменения потери теплового потока через стенку d при различных значениях скорости фильтрации w . Видно, что с увеличением скорости фильтрации возрастает длина цилиндрического нагревателя. При постоянной плотности теплового потока $1250 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и при скорости фильтрации $0,05 \text{ м/ч}$ длина цилиндрического нагревателя принимает значения от 0,56 м до 0,81 м, при $w=0,1 \text{ м/ч}$ длина цилиндрического нагревателя достигает пределов от 1,12 м до 1,62 м, при $w=0,2 \text{ м/ч}$ длина цилиндрического нагревателя увеличивается от 2,25 м до 3,24 м при потерях теплового потока от 0 до 0,3.

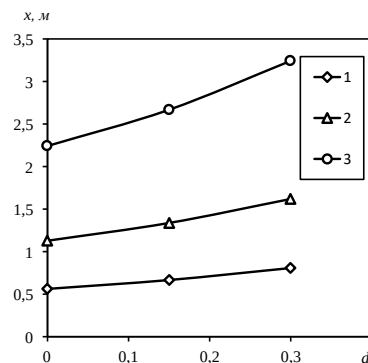


Рис. 3. Зависимость длины цилиндрического нагревателя от потери теплового потока через стенку при разных скоростях w , м/ч : 1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,2

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

На рисунке 4 представлена зависимость длины цилиндрического нагревателя от изменения скорости фильтрации w при различных значениях плотности теплового потока q_{10} . Видно, что с увеличением теплового потока уменьшается длина цилиндрического нагревателя. При плотности теплового потока $1000 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ длина цилиндрического нагревателя принимает значения от $0,83 \text{ м}$ до $3,3 \text{ м}$, при $q_{10}=1250 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ длина цилиндрического нагревателя достигает пределов от $0,66 \text{ м}$ до $2,64 \text{ м}$, при $q_{10}=1500 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ длина цилиндрического нагревателя уменьшается от $0,55 \text{ м}$ до $2,2 \text{ м}$ при постоянных потерях теплового потока $d = 0,15$.

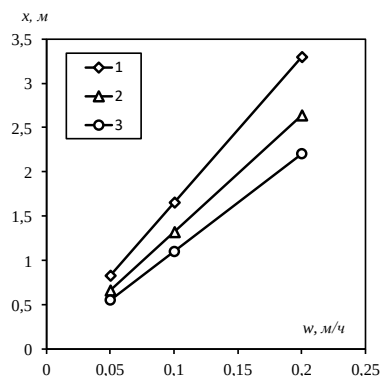


Рис. 4. Зависимость длины цилиндрического нагревателя от изменения скорости фильтрации при различных значениях плотности теплового потока q_{10} , $\text{Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$: 1 – 1000; 2 – 1250; 3 – 1500

Fig. 4. Dependence of the rod length on the change in filtration rate at different values of heat flux density: 1 – 1000; 2 – 1250; 3 – 1500

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

Заключение (Conclushion)

Длина цилиндрического нагревателя играет важную роль в процессе передачи тепла к нефти. Цилиндрический нагреватель должен иметь оптимальную длину, чтобы обеспечить равномерное распределение тепла по всей области воздействия, но в то же время она не должна быть слишком длинной, чтобы не увеличивать производственные затраты. Также следует учитывать, что при достижении критической температуры, газы, находящиеся на поверхности песка, начинают воспламеняться, что создает дополнительные риски и требует тщательного контроля температурного режима в реакторе. Песок, используемый внутри реактора, формирует пористую структуру. Эта структура играет важную роль в улучшении теплообмена, так как способствует более равномерному распределению жидкости и газов по объему реактора. Песок увеличивает площадь контакта между цилиндрическим нагревателем и нефтью, что также способствует более эффективному процессу разжижения.

Определение оптимальной длины цилиндрического нагревателя позволяет эффективно использовать ресурсы, избежать лишних затрат на материалы и снизить эксплуатационные издержки. К тому же помогает обеспечить поддержание нужной температуры, что критически важно для снижения вязкости нефти. Это позволяет нефти легче течь к поверхности, увеличивая эффективность добычи.

В ходе исследования была установлена необходимая длина цилиндрического нагревателя для размещения внутрискважинного реактора, предназначенного для добычи высоковязкой нефти. В результате работы было выведено уравнение, позволяющее рассчитать длину цилиндрического нагревателя при различных значениях радиуса цилиндрического нагревателя, линейной плотности теплового потока и скорости фильтрации. Получена формула, выражающая зависимость длины цилиндрического нагревателя от потери плотности теплового потока.

На основе исследований были получены зависимости расстояния, в реакторе при различных значениях радиуса цилиндрического нагревателя, линейной плотности теплового потока и скорости фильтрации. При значениях плотности теплового потока $1000 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $1250 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $1500 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ длина цилиндрического нагревателя при различных значениях потери плотности теплового потока принимает значения в диапазоне от $0,94 \text{ м}$ до 2 м ; при постоянных потерях плотности теплового потока – от $0,66 \text{ м}$ до $3,3 \text{ м}$; при постоянной плотности теплового потока равном $1250 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ при различных скоростях фильтрации $0,05 \text{ м/с}$, $0,1 \text{ м/с}$, $0,2 \text{ м/с}$ значения длины цилиндрического нагревателя варьируется от $0,56$ до $3,24 \text{ м}$. Было обнаружено, что при увеличении

теплового потока длина цилиндрического нагревателя уменьшается примерно в 2 раза, а при увеличении скорости фильтрации – увеличивается в 1,2 раза. При этом было выявлено, что при разных значениях радиуса цилиндрического нагревателя его длина остаётся неизменной, поскольку разница в длине цилиндрического нагревателя незначительна.

Литература

1. Шагеев А.Ф., Милютин В.А., Андрияшин В.В., и др. Способ добычи высоковязкой нефти с внутрискважинной тепловой активацией бинарного раствора. Патент РФ на изобретение №2812385 С1. 05.06.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=60787114>. Ссылка активна на 12 февраля 2025.
2. Асвинов Р.В. Повышение эффективности добычи нефти механизированным способом // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XIX Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2019. С. 423-426.
3. Брюховецкий О.С., Секисов А.Г., Керимов В.Ю., и др. Способ разработки нефтяных месторождений. Патент РФ на изобретение №2753318 С1 20.10.2020. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46478286>. Ссылка активна на 12 февраля 2025.
4. Гатаулин Р.Н. Интенсификация добычи нефти методами волнового воздействия на продуктивные пласты // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. 2020. №2. С. 78-90.
5. Wang Z., Fang, R., Guo, H. Advances in ultrasonic production units for enhanced oil recovery in China // Ultrasonics Sonochemistry. 2020. Vol. 60. pp. 104791.
6. Huanquan S., Wang H., Cao X., et al. Innovations and applications of the thermal recovery techniques for heavy oil // Energy Geoscience. 2024. Vol. 5, N4. pp. 100332.
7. Ali I., Gubarov S.I., Ovchinnikov K.A., et al. A dual-well system and thermal-gas-chemical formation treatment: Combined methods for high-viscosity oil production // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020. Vol. 194. pp. 107554.
8. Franco C., Franco C., Salinas L., et al. First field application of functionalized nanoparticles-based nanofluids in thermal enhanced oil recovery: From laboratory experiments to cyclic steam stimulation process // Fuel. 2025. Vol. 382. pp. 133736.
9. Мамедова Е.В. Перспективы применения газовых методов с целью повышения коэффициента извлечения нефти // Рассохинские чтения: Материалы международной конференции, 01–02 февраля 2024 г. Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2024. С. 183-186.
10. Tang Y., Wang H., Ge Q., et al. Experimental study of combined thermal flooding in improving heavy oil flowability // Energy Geoscience. 2025. Vol. 6, N1. pp. 100363.
11. Winanda D.F., Adisasmito S. Addition of surfactants to Low Salinity Waterflooding in microfluidics system to increase oil recovery // Petroleum Research. 2022. Vol. 7. N4. pp. 486-494.
12. Bossinov D., Ramazanova G., Turalina D. Comparison of measured and calculated high-viscosity crude oil temperature values in a pipeline during continuous pumping and shutdown modes // International Journal of Thermofluids. 2024. Vol. 24. pp. 100950.
13. Shagapov V.S., Tazetdinova Y.A., Gizzatullina A.A. On the theory of extraction of high-viscosity oil from the stratum under thermal action // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2019. Vol. 92. pp. 1415–1422.
14. Zhang Z., et al. Comparative analysis of wellbore electrical heating, low-frequency heating, and steam injection for in-situ conversion in continental shale oil reservoirs // Case Studies in Thermal Engineering. 2024. Vol. 64. pp. 105512.
15. Якимов Н.Д., Шагеев А.Ф., Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р. Особенности расчета температурного поля в кольцевом пористом слое при бесконечном нагреве // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. №6. С. 54-66.
16. Якимов Н.Д., Шагеев А.Ф., Дмитриев А.В., Мутугуллина И.А. Температурное поле в цилиндрическом пористом слое при «бесконечном» нагреве с оттоком теплоты // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26. №3. С. 146-155.

Авторы публикации

Дмитриев Андрей Владимирович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com

Шагеев Альберт Фаридович – ст. научный сотрудник Института геологии и нефтегазовых технологий, Научный центр мирового уровня Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты (головной центр), НИЛ методов увеличения нефтеотдачи, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0002-2852-9021>, shageevalbert@rambler.ru

Гильмутдинова Резеда Исаковна – студентка кафедры «Экономика и организация производства», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. gilmutdinovarezeda@mail.ru

References

1. Shageev AF, Milyutina VA, Andriyashin VV, et al. *Sposob dobychi vysokovyazkoi nefi s vnutriskvazhinnoi teplovoi aktivatsiei binarnogo rastvora*. Patent RUS №2812385 C1. 05.06.2023. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=60787114>. Accessed: 12 Feb. 2025. (In Russ).
2. Asvinov RV. Povyshenie effektivnosti dobychi nefi mekhanizirovannym sposobom. *Issledovaniya i razrabotki v oblasti mashinostroeniya, energetiki i upravleniya : materialy XIX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh*. 2019. Pp. 423-426. (In Russ).
3. Bryukhovetskii OS, Sekisov AG, Kerimov VYu, et al. *Sposob razrabotki neftyanykh mestorozhdenii*. Patent RUS №2812385 C1. 05.06.2023. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46478286>. Accessed: 12 Feb. 2025. (In Russ).
4. Gataullin RN. Intensifikatsiya dobychi nefi metodami volnovogo vozdeistviya na produktivnye plasty. *Nauchnye trudy NIPI Neftegaz GNKAR*. 2020;2:78-90. (In Russ). doi 10.5510/OGP20200200434.
5. Wang Z, Fang R, Guo H. Advances in ultrasonic production units for enhanced oil recovery in China. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020;6:104791. doi: 10.1016/j.ultsonch.2019.104791
6. Huanquan S, Wang H, Cao X, et al. Innovations and applications of the thermal recovery techniques for heavy oil. *Energy Geoscience*. 2024;5(4):100332. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2024.100332>
7. Ali I, Gubanov SI, Ovchinnikov KA, et al. A dual-well system and thermal-gas-chemical formation treatment: Combined methods for high-viscosity oil production. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020;194:107554. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107554>
8. Franco C, Franco C, Salinas L, et al. First field application of functionalized nanoparticles-based nanofluids in thermal enhanced oil recovery: From laboratory experiments to cyclic steam stimulation process. *Fuel*. 2025;382:133736. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133736>
9. Mamedova EV. Perspektivy primeneniya gazovykh metodov s tsel'yu povysheniya koeffitsienta izvlecheniya nefi. *Rassokhinskie chteniya : Materialy mezhdunarodnoi konferentsii*, Ukhta, 01–02 Feb 2024. Ukhta: Ukhinskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2024. Pp. 183-186. (In Russ).
10. Tang Y, Wang H, Ge Q, et al. Experimental study of combined thermal flooding in improving heavy oil flowability. *Energy Geoscience*. 2025;6(1):100363. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2024.100363>
11. Winanda DF, Adisasmito S. Addition of surfactants to Low Salinity Waterflooding in microfluidics system to increase oil recovery. *Petroleum Research*. 2022;7(4):486-494. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2021.12.011>
12. Bossinov D, Ramazanov G, Turalina D. Comparison of measured and calculated high-viscosity crude oil temperature values in a pipeline during continuous pumping and shutdown modes. *International Journal of Thermofluids*. 2024;24:100950. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100950>
13. Shagapov VS, Tazetdinova YA, Gizzatullina AA. On the theory of extraction of high-viscosity oil from the stratum under thermal action. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2019;92:1415–1422.
14. Zhang Z, et al. Comparative analysis of wellbore electrical heating, low-frequency heating, and steam injection for in-situ conversion in continental shale oil reservoirs. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024;64:105512. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105512>
15. Yakimov ND, Shageev AF, Dmitriev AV, Badretdinova GR. Osobennosti rascheta temperaturnogo polya v kol'tsevom poristom sloe pri beskonechnom nagreve. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2023; 25(6):54-66. (In Russ). DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-54-66. – EDN GUULKZ.
16. Yakimov ND, Shageev AF, Dmitriev AV, Mutugullina IA. Temperaturnoe pole v tsilindricheskom poristom sloe pri «beskonechnom» nagreve s ottokom teploty. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2024; 26(3):146-155. (In Russ).

Authors of the publication

Andrey V. Dmitriev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com

Albert F. Shageev – Institute of Geology and Petroleum Technologies, World-class Scientific Center for the Rational Development of liquid hydrocarbon reserves of the planet (head center), Research laboratory of methods for increasing oil recovery, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0002-2852-9021>, shageevalbert@rambler.ru

Rezeda I. Gilmudinova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. gilmudinovarezeda@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено 17.02.2025 г.

Отредактировано 11.03.2025 г.

Принято 15.03.2025 г.



АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЫРЬЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМБИНИРОВАННОГО БРИКЕТА

Рыжиков В.А., Ерохина О.А., Аким Э.Л., Луканин П.В.

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна. Высшая школа технологии и энергетики, г. Санкт-Петербург, Россия
ryzhikov_vladimir@bk.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Представлены результаты исследования по определению влияния параметров сырья – влажности и температуры в процессе прессования на физико-механические свойства полученного комбинированного брикета, состоящего из твердых древесных отходов и отходов ламинированной бумаги (лам.бумага). Приводится анализ топок различной конструкции при сжигании полученных брикетов, содержащих синтетические полимеры. Результаты исследований позволят использовать полученный композиционный материал с максимальной энергетической эффективностью при сжигании его в промышленных энергоустановках. *ЦЕЛЬЮ* исследования является определение влияния различных значений влажности и температуры в процессе прессования сырья, на конечные физико-механические параметры комбинированного брикета, такие как плотность и прочность. Проведен анализ величины сжатия брикета при различных композициях сырья и анализ различных топочных конструкций при сжигании полученного топливного брикета. *МЕТОДЫ.* В работе были использованы методы: анализ термопластичности и влагопластичности полимерных компонентов используемого сырья в процессе формирования брикета с различными композициями сырья; нормативный метод расчета котлоагрегатов с различными конструкциями топочных устройств для определения основных параметров котла при сжигании комбинированного брикета; построение зависимости величины сжатия брикета в процессе прессования от влажности и температуры при различных композициях сырья. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В работе представлены результаты: физико-механических параметров брикета при заданных параметрах влажности и температуры; основных значений теплового расчета котлоагрегата с различными конструкциями топок; величина сжатия сырья в пресс-форме в зависимости от параметров влажности и температуры, а также, от композиции сырья. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Полученные результаты позволят использовать комбинированные брикеты из древесных отходов и отходов ламинированной бумаги, с максимальной энергетической, экономической и экологической эффективностью при их сжигании в котельных установках. Полученные комбинированные брикеты имеют высокие физико-механические параметры при определенных условиях и композициях сырья, что облегчает процесс транспортировки и хранения топлива.

Ключевые слова: котельные установки; синтетические полимеры; топливные брикеты; твердое биотопливо; отходы промышленных предприятий; релаксационные состояния; теплотехнические параметры; экология.

Для цитирования: Рыжиков В.А., Ерохина О.А., Аким Э.Л., Луканин П.В. Анализ влияния теплотехнических характеристик сырья на физико-механические свойства комбинированного брикета // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 197-210. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-197-210.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF HEAT ENGINEERING CHARACTERISTICS OF RAW MATERIALS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF COMBINED BRIQUETTE

Ryzhikov V.A., Erokhina O.A., Akim E.L., Lukanin P.V.

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg, Russia
ryzhikov_vladimir@bk.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The paper presents the results of research to determine the influence of such raw material parameters as humidity and temperature in the pressing process on the physical and mechanical properties of the obtained briquette, as well as the analysis of furnaces of different designs during combustion of the obtained composite briquette consisting of solid wood waste and laminated paper waste containing synthetic polymers. The results of these studies will allow to use the obtained composite material with maximum energy efficiency when burning it in industrial power plants. *THE GOAL* of the research is to determine the effect of different values of humidity and temperature, in the process of pressing raw materials, on the final physical and mechanical parameters of the combined briquette, such as density and strength. Analyzing different furnace designs when burning the resulting fuel briquette, as well as analyzing the magnitude of compression of the briquette at different compositions of raw materials. *METHODS.* In this paper were used methods: analysis of thermoplasticity and moisture plasticity of polymer components of the raw materials used in the process of briquette formation with different compositions of raw materials; normative method of calculation of boiler units with different designs of furnace devices to determine the basic parameters of the boiler at combustion of combined briquette; construction of the dependence of the briquette compression value in the process of pressing on humidity and temperature with different compositions of raw materials. *RESULTS.* The paper presents the results of: physical and mechanical parameters of the briquette at given parameters of humidity and temperature; basic values of thermal calculation of the boiler unit with different designs of furnaces; the amount of compression of raw materials in the mold depending on the parameters of humidity and temperature, as well as, from the composition of raw materials. *CONCLUSION.* The obtained research results will allow to use combined briquettes from wood waste and laminated paper waste, with maximum energy, economic and environmental efficiency in their combustion in boiler plants. The obtained combined briquettes have high physical and mechanical parameters under certain conditions and compositions of raw materials, which facilitates the process of transportation and storage of fuel.

Keywords: boiler plants; synthetic polymers; fuel briquettes; solid biofuels; industrial wastes; relaxation states; heat engineering parameters; ecology.

For citation: Ryzhikov V.A., Erokhina O.A., Akim E.L., Lukanin P.V. Analysis of the influence of heat engineering characteristics of raw materials on physical and mechanical properties of combined briquette. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (2): 197-210. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-197-210.

Введение (Introduction)

Актуальность материалов, изложенных в данной статье, рассматривалась в работе «Исследование физико-химических характеристик альтернативного топлива, содержащего синтетические полимеры» [1].

По данным Минпромторга (Министерство промышленности и торговли Российской Федерации), в Российской Федерации каждый год образуется от 3,6 до 5 млн. тонн пластиковых отходов, а переработке подвергаются лишь 7-10% отходов при различии степени переработки по различным видам пластика, а мировое производство пластиковых материалов превышает 400 млн. тонн в год [2]. Согласно ежегодному докладу о пластике «Earth Action» прогнозируется, что в 2024 году 31,5% производимого и используемого пластика в мире, скорее всего, попадут в воздух, воду или почву Земли [3-5]. Это означает, что 69,5 млн. тонн дополнительных пластиковых отходов окажутся в природе [3]. К 2040 году производство пластика в мире удвоится, а загрязнение пластиком утроится. Пластиковое загрязнение – это экологический кризис, суть которого в дисбалансе между объемами пластика, который производится и используется, и способностью мира управлять этими объемами, когда они становятся отходами. Дисбаланс приводит к тому, что значительное количество пластика ежегодно попадает в окружающую среду, причем большая часть попадает в океаны. Неправильное обращение с пластиковыми отходами представляет собой серьезную угрозу глобальным экосистемам и, как следствие, благополучию человека [3-4].

В России в 2024 году порядка 3,2 миллиона тонн пластиковых отходов попадет в категорию «mismanaged». Это значит, что они не просто не будут переработаны, но даже не будут размещены на полигонах твердых бытовых отходов (ТБО) – то есть осядут в водоемах или незаконных стихийных свалках [3].

Эти данные свидетельствуют о необходимости срочных мер по сокращению производства и потребления пластика, а также по совершенствованию систем его переработки. Большую часть отходов синтетических полимеров занимает упаковка и упаковочная пленка. Структура пластиковых отходов представлена на рисунке 1 [1].



Рис. 1. Структура пластиковых отходов в составе ТБО

Fig. 1. Structure of plastic waste in the composition of MSW

*Источник: Пластик и пластиковые отходы в России: ситуация, проблемы и рекомендации. Международная Сеть по Ликвидации Загрязнителей Source: International Pollutants Elimination Network

Исходя из этого, на сегодняшний день борьба с пластиковым загрязнением является одной из основных задач для улучшения экологической обстановки и обеспечения безопасности населения в РФ.

В данной работе представлены результаты, необходимые для использования полученных топливных брикетов, содержащих синтетические полимеры и древесные отходы, с максимальной энергетической, экономической и экологической эффективностью. Такие параметры, как влажность и температура, оказывают значительное влияние на физико-механические свойства готового брикета, так как в процессе формирования брикета реализуются свойства термовлагопластичности полимерных компонентов сырья. Комбинированный инновационный брикет представляется в различных композициях сырья и при различных переменных теплотехнических характеристиках [6-8]. Обосновываются достоинства и недостатки каждой композиции сырья для изготовления брикетов, содержащих синтетические полимеры.

Научная значимость заключается в получении новых результатов влияния влажности и температуры сырья на этапе формирования топливного брикета на прочность и плотность получаемого брикета. Влияние влажности и температуры сырья на этапе формирования брикета напрямую сказывается на плотности и прочности получаемого брикета. Использование сырья в различных композициях имеет свои достоинства и недостатки, зависящие от взаимодействия древесных полимерных компонентов и синтетических полимеров, в частности, от их перехода из одного релаксационного состояния в другое [9]. Выявлено, что при определенной температуре синтетические полимеры переходят из стеклообразного состояния в высокоэластическое, и, в комбинации с древесными отходами, придают дополнительный связующий эффект, когда остывают и достигают температуры стеклования, что, несомненно, повышает прочность и плотность готового брикета, а также, увеличивает способность сырья к деформации в процессе формирования брикета. Проведенный анализ топочных устройств различной конструкции позволяет подобрать оптимальную энергоустановку по основным показателям теплового расчета, с определенной конструкцией топки, что показывает возможность реализации данного топлива как в промышленности, так и в бытовых целях.

Практическая значимость исследований основывается на том, что результаты работы, изложенные в данной статье, показывают возможность частичного решения проблемы пластикового загрязнения в РФ [10-11]. Использование полученного инновационного топлива, прежде всего, повысит экологическую безопасность страны и позволит уменьшить количество не утилизируемых пластиковых отходов.

Материалы и методы (Materials and methods)

В работе были использованы методы: анализ термопластичности и влагопластичности полимерных компонентов используемого сырья в процессе

формирования брикета с различными композициями сырья [9]; нормативный метод расчета котлоагрегатов с различными конструкциями топочных устройств для определения основных параметров котла при сжигании комбинированного брикета; построение зависимости величины сжатия брикета в процессе прессования от влажности и температуры с различными композициями сырья.

Основными материалами в ходе работы были: твердые древесные отходы лиственницы [12-13] и отходы производства ламинированной бумаги, с содержанием синтетического полимера, в качестве которого был использован полиэтилен марки 11503-070 низкой плотности (высокого давления) [14-15] в соотношении с бумагой 50/50%.

Ход исследования состоял из следующих этапов:

- Были использованы несколько вариантов композиций из измельченных древесных отходов и измельченной ламинированной бумаги [1], массой 2 грамма: (100/0% (древесина/лам.бумага), 70/30% (древесина/лам.бумага) 50/50% (древесина/лам.бумага), 30/70% (древесина/лам.бумага), 0/100% (древесина/лам.бумага)) [1];
- Увлажнение сырья, во всех исследуемых композициях, насыщенным паром в разных временных промежутках;
- Определение зависимости приобретенной влажности сырья от времени увлажнения насыщенным паром при различных композициях исходного материала;
- Проведение анализа зависимости плотности и прочности брикета при различных значениях влажности сырья и при комнатной температуре (20°C) для трех исследуемых композиций исходного материала;
- Проведение анализа зависимости плотности и прочности брикета при различных значениях температуры в процессе прессования и при одинаковом времени пропарки сырья (15 с).
- Изучение процесса совместного сжатия твердых древесных отходов и отходов лам. бумаги в различных соотношениях и построение графика для наиболее подходящей композиции сырья;
- Проведение сравнительного анализа основных параметров топочных устройств различной конструкции в котлоагрегате при сжигании полученного комбинированного брикета;
- Проведение теплового расчета котлоагрегата БКЗ 75-39 ФБ согласно нормативному методу [16];
- Проведение расчета вредных выбросов при сжигании полученного комбинированного топливного брикета в выбранном котлоагрегате;
- Проведение расчета экономического эффекта за счет перехода на сжигание комбинированного топливного брикета.

Результаты (Results)

В целях насыщения смеси сырья влагой и приданию ей свойств термовлагопластичности, была проведена пропарка. Смесь обогащалась насыщенным паром в течение определенного временного интервала. Была установлена зависимость повышения влажности смеси от времени пропарки у различных композиций сырья, данные приведены на рисунке 2.

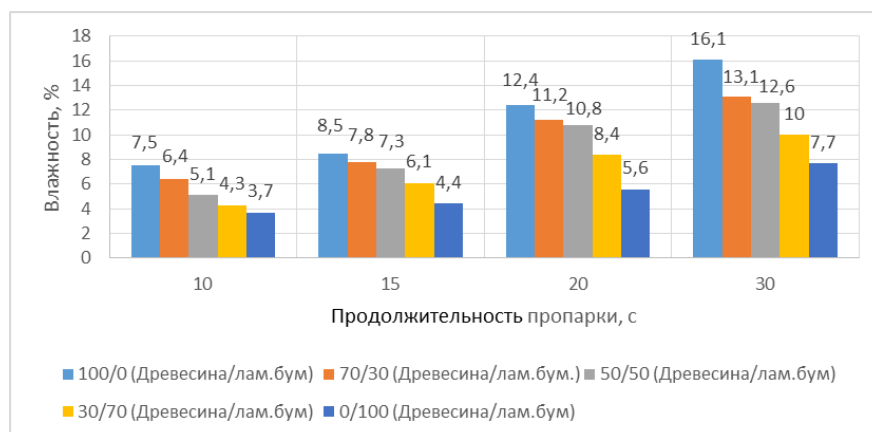


Рис. 2. Зависимость влажности сырья от продолжительности пропарки

Fig. 2. Dependence of raw material moisture content on steaming duration

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

Дальнейший этап проведения эксперимента включал в себя процесс формирования топливного брикета с различными композициями сырья, из заранее подготовленной смеси. Прессование осуществлялось с помощью пресс-формы на универсальной испытательной установке Instron1121 в режиме одноосного сжатия до нагрузки $P = 4500$ Н с последующим эластическим восстановлением формы образца при скорости деформирования $V = 100$ мм/мин и различных значениях влажности и температуры. Результатом проведения данного этапа эксперимента – являлось определение зависимости плотности и прочности (в поперечном направлении) полученных образцов от переменных параметров влажности и температуры. Результаты представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Table 1

Результаты определения физико-механических параметров топливного брикета при температуре $t = 20^\circ\text{C}$

Results of determination of physical and mechanical parameters of fuel briquette at temperature $t = 20^\circ\text{C}$

Композиция №1 – 100% древесные отходы						
Время пропарки $\tau, \text{с}$	Исходная влажность сырья $W_{\text{исх}}, \%$	Высота брикета, мм	Диаметр брикета, мм	Среднее значение плотности брикета $\rho_{\text{ср}}, \text{кг/м}^3$	Среднее значение влажности полученного брикета $W_{\text{бр}}, \%$	Прочность на сжатие $\sigma_{\text{сж}}, \text{Н}$
10	7,5	13,4	14,2	679	4,6	0
15	8,5	15,4		646	5,7	0
20	12,4	16,1		635	8,1	0
Композиция №2 – 50% древесные отходы, 50% ламинированная бумага						
Время пропарки $\tau, \text{с}$	Исходная влажность сырья $W_{\text{исх}}, \%$	Высота брикета, мм	Диаметр брикета, мм	Среднее значение плотности брикета $\rho_{\text{ср}}, \text{кг/м}^3$	Среднее значение влажности полученного брикета $W_{\text{бр}}, \%$	Прочность на сжатие $\sigma_{\text{сж}}, \text{Н}$
10	5,1	12,2	14,2	715	2,4	50
15	7,3	12,9		710	3,9	50
20	10,8	13,5		704	4,5	50
Композиция №3 – 100% ламинированная бумага						
Время пропарки $\tau, \text{с}$	Исходная влажность сырья $W_{\text{исх}}, \%$	Высота брикета, мм	Диаметр брикета, мм	Среднее значение плотности брикета $\rho_{\text{ср}}, \text{кг/м}^3$	Среднее значение влажности полученного брикета $W_{\text{бр}}, \%$	Прочность на сжатие $\sigma_{\text{сж}}, \text{Н}$
10	3,7	12,1	14,2	801	1,5	0
15	4,4	12,2		794	1,9	0
20	5,6	12,7		787	2,1	0

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

Ниже представлены графики (рис. 3-5) зависимости изменения средних значений плотности топливного брикета от влажности при комнатной температуре (20°C).

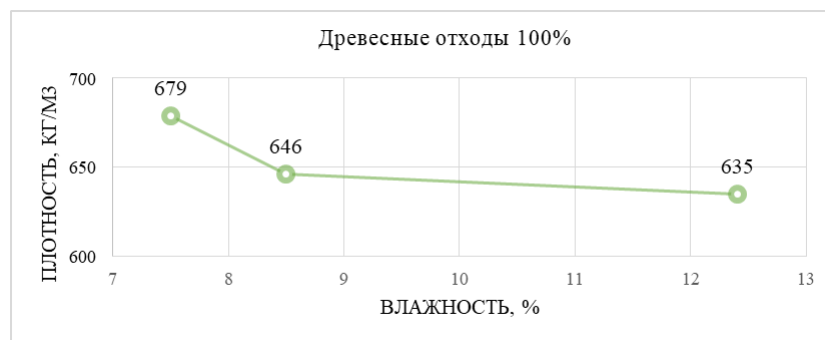


Рис. 3. Зависимость среднего значения плотности топливного брикета от влажности для композиции № 1 (100% древесных отходов)

Fig. 3. Dependence of average value of fuel briquette density on moisture content for composition № 1 (100% wood waste)

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

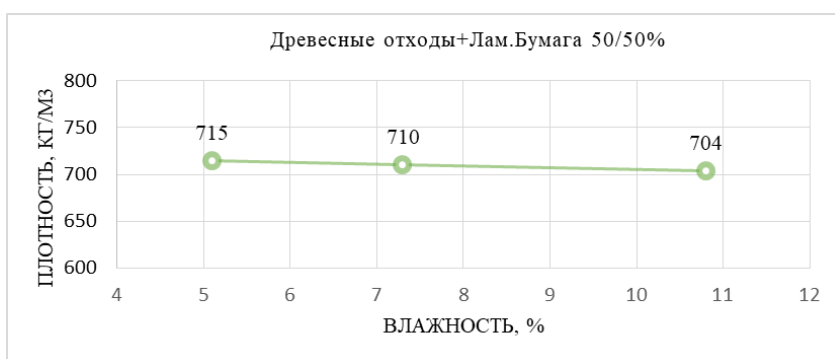


Рис. 4. Зависимость среднего значения плотности топливного брикета от влажности для композиции № 2 (50% древесных отходов, 50% отходов лам. бумаги)

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

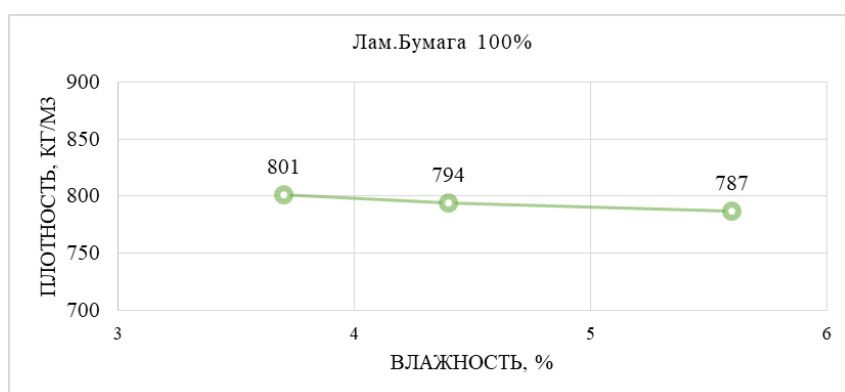


Рис. 5. Зависимость среднего значения плотности топливного брикета от влажности для композиции № 3 (100% отходов лам. бумаги)

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

Таблица 2

Table 2

Результаты определения физико-механических параметров топливного брикета при времени пропарки $\tau = 15$ с и температурах $t = 20, 50, 80^\circ\text{C}$

Results of determination of physical and mechanical parameters of fuel briquette at steaming time $\tau = 15$ s and temperatures $t = 20, 50, 80^\circ\text{C}$

Композиция №1 – 100% древесные отходы						
Температура в процессе прессования t, °С	Исходная влажность сырья W _{исх} , %	Высота брикета, мм	Диаметр брикета, мм	Среднее значение плотности брикета ρ _{ср} , кг/м ³	Среднее значение влажности полученного брикета W _{бр} , %	Прочность на сжатие σ _{сж} , Н
20	8,5	15,4	14,2	648	5,7	0
50		13,1	14,2	901	5,7	70
80		12,7	14,2	952	5,2	100
Композиция №2 – 50% древесные отходы, 50% ламинированная бумага						
Температура в процессе прессования t, °С	Исходная влажность сырья W _{исх} , %	Высота брикета, мм	Диаметр брикета, мм	Среднее значение плотности брикета ρ _{ср} , кг/м ³	Среднее значение влажности полученного брикета W _{бр} , %	Прочность на сжатие σ _{сж} , Н
20	7,3	12,9	14,2	710	3,9	50
50		12,4	14,2	958	4,4	150
80		11,8	14,2	1036	3,7	350

Композиция №3 – 100% ламинированная бумага						
Температура в процессе прессования t , °C	Исходная влажность сырья $W_{исх}$, %	Высота брикета, мм	Диаметр брикета, мм	Среднее значение плотности брикета $\rho_{бр}$, кг/м ³	Среднее значение влажности полученного брикета $W_{бр}$, %	Прочность на сжатие $\sigma_{сж}$, Н
20	4,4	12,2	14,2	794	1,9	0
50		11,9	14,2	990	1,7	100
80		11,2	14,2	1042	1,5	100

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

Ниже представлены графики (рис. 6-8) зависимости изменения средних значений плотности топливного брикета от температуры (20, 50, 80°C) при одинаковом времени пропарки (15 с).

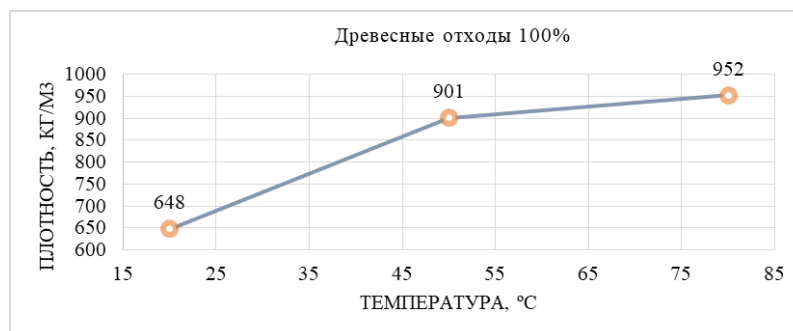


Рис. 6. Зависимость среднего значения плотности топливного брикета от температур (20, 50, 80°C) для композиции № 1 (100% древесных отходов)

Fig. 6. Dependence of the average value of fuel briquette density on temperatures (20, 50, 80°C) for composition № 1 (100% wood waste)

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

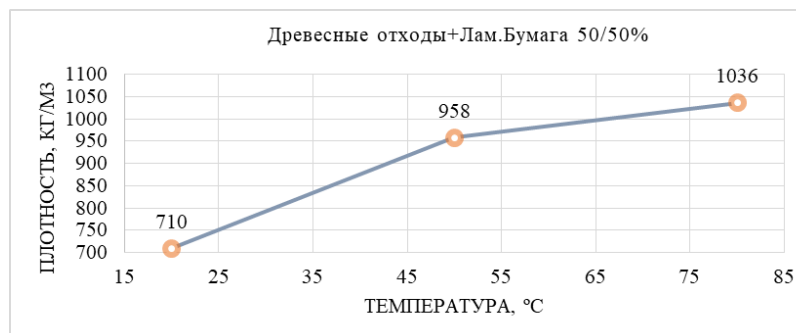


Рис. 7. Зависимость среднего значения плотности топливного брикета от температур (20, 50, 80°C) для композиции № 2 (50% древесных отходов, 50% отходов лам. бумаги)

Fig. 7. Dependence of average value of fuel briquette density on temperatures (20, 50, 80°C) for composition № 2 (50% wood waste, 50% lamp paper waste)

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

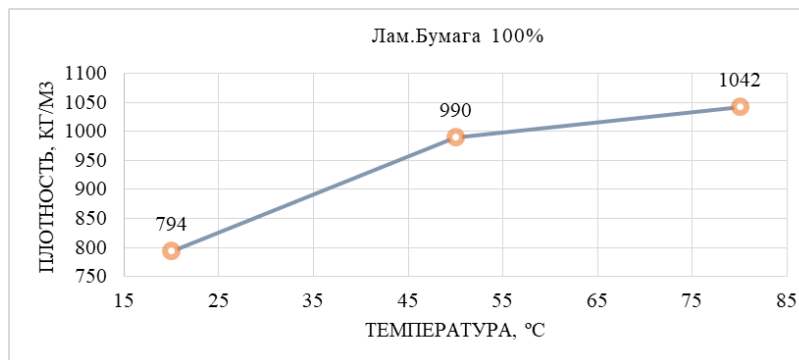


Рис. 8. Зависимость среднего значения плотности топливного брикета от температур (20, 50, 80°C) для композиции № 3 (100% отходов лам. бумаги)

Fig. 8. Dependence of the average value of fuel briquette density on temperatures (20, 50, 80°C) for composition № 3 (100% lamp paper waste)

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

По результатам исследования видно, что влажность в меньшей степени влияет на плотность и прочность брикета, чем температура. При постоянной температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$ и различных временных интервалах пропарки (различной влажности), средняя плотность образцов составила 719 кг/м^3 , при увеличении процентной влажности – плотность образцов снижалась для каждой из трех композиций. Показатель прочности на поперечное сжатие составил 50 Н только в композиции 50/50%, это обуславливается влагопластичностью древесных полимерных компонентов при взаимодействии с отходами ламинированной бумаги. В остальных двух композициях брикет имел нулевую прочность, переставая сохранять целостность уже в процессе извлечения его из пресс-формы.

При температурах 20, 50 и 80°C и одинаковом времени пропарки (15 секунд) средняя плотность образцов составила: 717 кг/м^3 при 20°C , 950 кг/м^3 при 50°C и 1010 кг/м^3 при 80°C . Самый высокий показатель прочности имела композиция 50/50% при температуре 80°C и составила 350 Н. Это объясняется изменением релаксационного состояния синтетического полимера (полиэтилена). При температуре выше 60°C полиэтилен марки 11503-070 (низкой плотности и высокого давления) переходит из стеклообразного релаксационного состояния в высокоэластическое, тем самым становится дополнительным связующим элементом при формировании брикета. Исходя из этого, брикет имеет высокую прочность и не сильно уступает в плотности образцу под номером 3, имея значение в 1036 кг/м^3 .

Резюмируя вышесказанное, для дальнейших исследований был выбран брикет с композицией древесных отходов и отходов ламинированной бумаги – 50/50%.

В дальнейшем были построены графики процесса сжатия древесных отходов и отходов ламинированной бумаги в соотношении 50/50% при различном времени пропарки сырья и температуре прессования. Результаты представлены на рисунках 9 и 10.

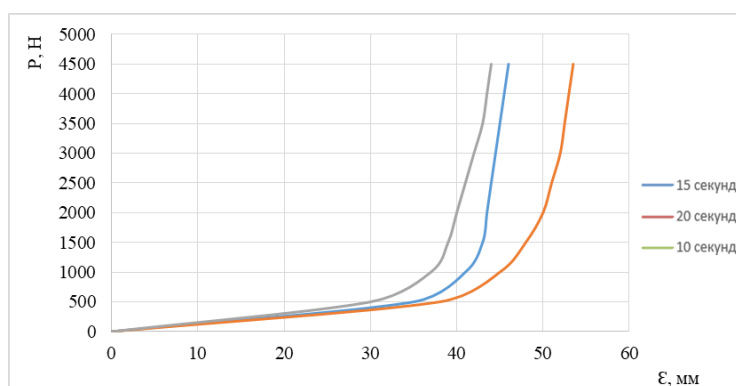


Рис. 9. График процесса сжатия измельченных древесных отходов и отходов ламинированной бумаги [1] в соотношении 50/50% при постоянной температуре (20°C) и различном времени пропарки сырья (10с, 15с, 20с)

Fig. 9. Graph of compression process of shredded wood waste and laminated paper waste in 50/50% ratio at constant temperature (20°C) and different steaming time of raw materials (10s, 15s, 20s)

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

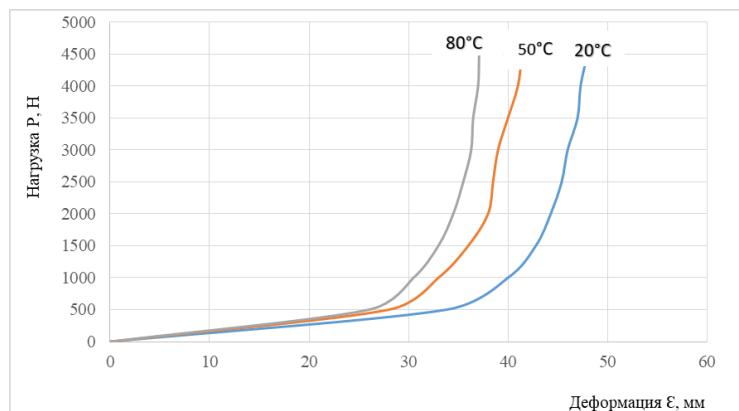


Рис. 10. График процесса сжатия измельченных древесных отходов и отходов ламинированной бумаги в соотношении 50/50% при различных температурах (20, 50, 80°C) и постоянном времени пропарки сырья (15 с)

Fig. 10. Graph of compression process of shredded wood waste and laminated paper waste in 50/50% ratio at different temperatures (20, 50, 80°C) and constant raw material steaming time (15 s)

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

Следующий этап исследования предусматривал анализ топок различной конструкции в котлоагрегате, с целью определения оптимальной топочной конструкции для сжигания полученного комбинированного брикета в соотношении древесных отходов и отходов ламинированной бумаги 50/50%. Для корректного сравнения был выбран котлоагрегат с одинаковыми номинальными параметрами (паропроизводительностью и давлением пара). По результатам расчета материального баланса, теплового баланса и расчету топочных камер, были получены следующие результаты, представленные в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Результаты расчетов котлоагрегата с различными топочными камерами

Results of calculations of boiler unit with different furnace chambers

Параметр	НТВ	Факельное сжигание	Слоевое сжигание	Кипящий слой
Паропроизводительность D , кг/с	20,9	20,9	20,9	20,9
Давление перегретого пара P , МПа	3,9	3,9	3,9	3,9
Температура уходящих газов $\vartheta_{\text{ух}}$, °С	120	120	150	145
Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки α	1,2	1,2	1,4	1,3
Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг	21	21	21	21
Сумма тепловых потерь $\sum q$, %	7,15	6,72	13,4	13,9
КПД η , %	92,85	93,28	86,6	86,1
Расход топлива B , кг/с	2,94	2,88	2,95	2,7
Адиабатная температура горения t_a , °С	1658	1854	1101	1263
Температура газов на выходе из топки ϑ'' , °С	1064	963	862	801
Теплонапряжение топочного объема q_v , кВт/м ³	152	67	72	115

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

По результатам, представленным в таблице 3, можно сделать вывод, что камерное сжигание (НТВ, факельное) является наиболее предпочтительным, так как, КПД котлоагрегата находится в пределах 92-93%, в отличие от слоевого сжигания, где КПД располагается в диапазоне 86-87%. Также, слоевое сжигание в реальных условиях ограничено паропроизводительностью в 25-30 т/ч. Для повышения паропроизводительности, в случае слоевой топочной камеры, требуются огромные габариты самой топки, и как следствие, самого котлоагрегата. При камерном сжигании, адиабатная температура в низкотемпературной вихревой топке (НТВ) [17-18] составляет 1658°С, что меньше на 200°С по сравнению с факельным сжиганием в топке стандартной конструкции. Это дает пониженное образование термических оксидов азота, так как их формирование зависит от величины температуры в зоне активного горения. Также, при использовании низкотемпературной вихревой топочной камеры, упрощается процесс подготовки топлива, так как отсутствует полноценная система пылеприготовления, соответственно, уменьшаются затраты на электроэнергию на размол до более мелкой фракции. Помимо этого, в низкотемпературной вихревой топке, используется принцип ступенчатого сжигания, что дополнительно понижает образование оксидов азота. При использовании НТВ технологии, также, исключается шлакование и загрязнение топочных и конвективных поверхностей нагрева.

Все эти факторы делают низкотемпературную вихревую топочную камеру лучшим выбором среди конструкций топочных камер для сжигания полученного комбинированного брикета.

Был также проведен расчет вредных выбросов оксидов азота при сжигании комбинированного брикета, в соотношении сырья 50/50%, в топках различной конструкции. Результаты приведены на рисунке 11.

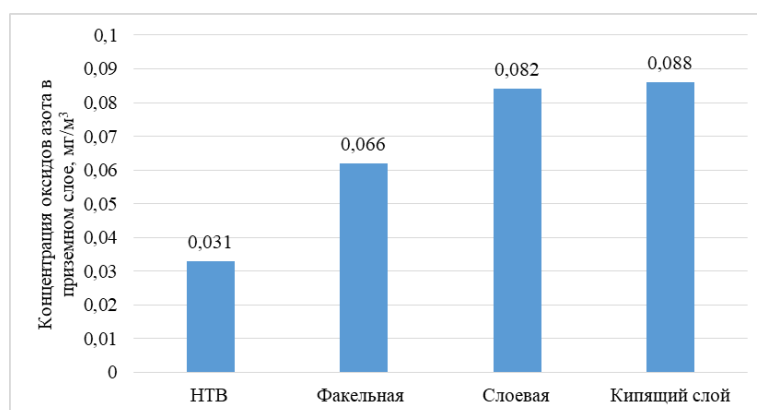


Рис. 11. Вредные выбросы оксидов азота при сжигании полученного брикета 50/50% в топках различной конструкции

Fig. 11. Harmful emissions of nitrogen oxides at combustion of the obtained 50/50% briquette in furnaces of different design

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

По полученным данным видно, что при сжигании топливного брикета 50/50% в низкотемпературной вихревой топке за счет пониженной температуры в зоне активного горения и ступенчатого сжигания, образуется наименьшее количество вредных выбросов оксидов азота.

Полученная ранее низшая теплота сгорания комбинированного брикета, в соотношении сырья 50/50%, равная 21 МДж/кг [1], является высокой для подобного вида топлива. Сравнительная диаграмма значений низших теплот сгорания различных видов твердых топлив представлена на рисунке 12.

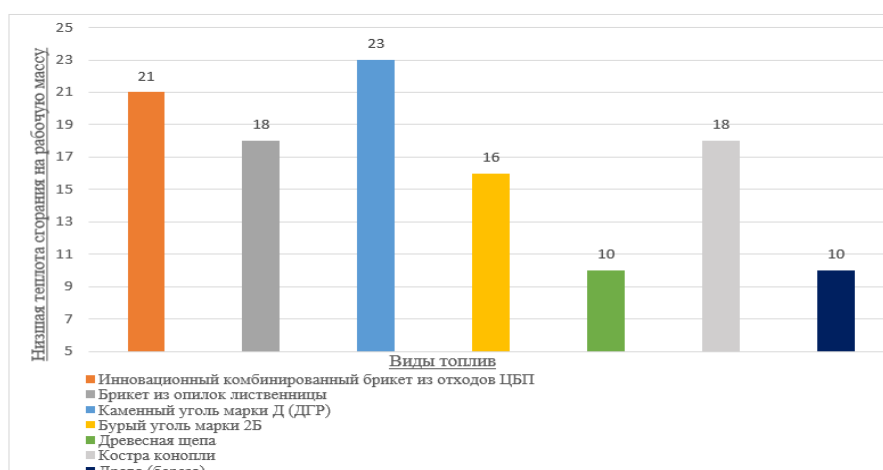


Рис. 12. Сравнение значений низших теплот сгорания различных видов топлив

Fig. 12. Comparison of values of lower calorific values of different fuels

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

В качестве примера, для сжигания был выбран котлоагрегат БКЗ-75-39 ФБ с низкотемпературной вихревой топкой Померанцева.

Для данного котла был проведен ряд теплотехнических расчетов. Результаты расчета теплового баланса котлоагрегата БКЗ-75-39ФБ представлены в таблице 4.

Таблица 4

Table 4

Результаты расчета теплового баланса БКЗ-75-39ФБ

Results of calculation of heat balance of BKZ-75-39FB

Наименование параметра	Значение
Низшая теплота сгорания топлива Q_i^* , МДж/кг	21
Сумма тепловых потерь $\sum q$, %	7,15
КПД котла η , %	92,85
Расчетный расход топлива B_p , кг/с	2,86
Температура уходящих газов ϑ_{yx} , °C	120

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

На рисунке 13 представлена диаграмма расчетных температур дымовых газов за поверхностями нагрева котла БКЗ-75-39ФБ [16].

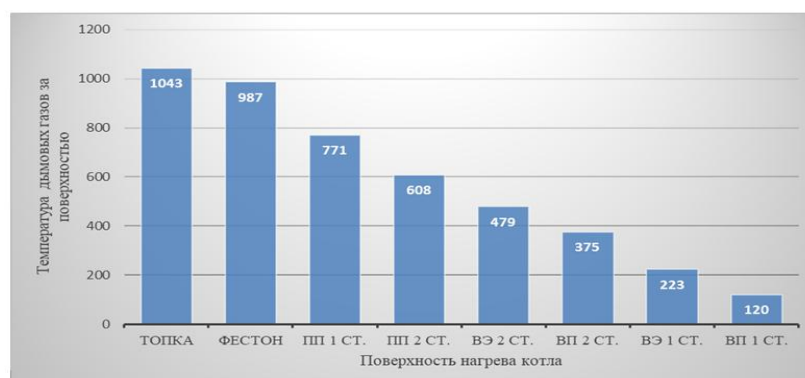


Рис. 13. Расчетные температуры дымовых газов за поверхностями нагрева *Fig. 13. Calculated flue gas temperatures behind the heating surfaces*

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

В дальнейшем был проведен сравнительный анализ расчетных параметров котлоагрегата БКЗ-75-39ФБ на полученном комбинированном брикете 50/50% и древесном брикете из опилок лиственницы с влажностью 4%. Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5

Table 5

Сравнение расчетных параметров котлоагрегата при сжигании брикетов

Comparison of design parameters of boiler unit at briquette combustion

Параметр	Комбинированный брикет 50/50%	Древесный брикет из опилок лиственницы
Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг	21	18
Объем дымовых газов V_r , м ³ /кг	6,4	6,9
Температура уходящих газов ϑ_{yx} , °C	120	120
Потери тепла с ух. газами q_2 , %	5,2	6,3
Сумма тепловых потерь в котле, $\sum q$, %	7,15	8,25
КПД котла η , %	92,85	91,75
Расчетный расход топлива V_r , кг/с	2,86	3,5

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

За счет уменьшения расхода топлива возрастет экономический эффект использования инновационного комбинированного брикета, при таких же номинальных параметрах котлоагрегата. Данные расчета снижения расхода топлива представлены в таблице 6.

Таблица 6

Table 6

Экономический эффект за счет снижения расхода топлива

Economic effect due to reduced fuel consumption

Параметр	Комбинированный брикет 50/50%	Древесный брикет из опилок лиственницы
Стоимость 1 тонны топлива, руб.	6500	6500
Годовой расход топлива, т/год	90193	110376
Затраты на топливо в год, без учета логистики, млн. руб.	586,3	717,4

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

Годовая экономия за счет снижения расхода топлива составит 131,1 млн. рублей.

Заключение (Conclusions)

1. Определены оптимальные параметры сырья для формирования комбинированного брикета, состоящего из твердых древесных отходов и отходов ламинированной бумаги: температура 80°C и влажность 7,3%;

2. Определено влияние теплотехнических характеристик сырья (температура и влажность) на физико-механические свойства брикета (плотность и прочность) при различных композициях сырья. Оптимальным являлся брикет с соотношением сырья 50/50%, имеющий плотность 1036 кг/м³ и прочность на поперечное сжатие 350 Н;

3. Проанализирован график процесса сжатия двух видов сырья в соотношении 50/50% в зависимости от различных значений температуры и влажности. Наиболее быстрое сжатие происходило при температуре 80°C и времени пропарки 10 секунд.

4. Проведен анализ топок различной конструкции в котлоагрегате и была выбрана низкотемпературная вихревая топка для сжигания полученного комбинированного брикета 50/50%. Данный выбор обусловлен тем, что в НТВ-топке небольшая, относительно факельного способа, температура в зоне активного горения и применяется способ ступенчатого сжигания, что, в сумме, дает пониженные выбросы оксидов азота, равные 0,031 мг/м³.

5. Выбрана энергоустановка для сжигания полученного брикета – котлоагрегат БКЗ-75-39 ФБ с низкотемпературной вихревой топкой Померанцева, имеющий КПД 92,85%.

6. При сравнительном анализе сжигания полученного брикета и стандартного древесного брикета из опилок лиственницы, КПД котельной установки увеличился более чем на 1% и на 21% снизился расход топлива. Эти факторы приводят к снижению экономических затрат на потребление топлива котлоагрегатом, а также, повышается общая эффективность работы котла и вспомогательного оборудования.

7. Экономический эффект с переходом на полученный комбинированный брикет составит 131,1 млн. рублей в год.

Литература

1. Исследование физико-химических характеристик альтернативного топлива, содержащего синтетические полимеры / В. А. Рыжиков, О. А. Ерохина, Э. Л. Аким, П. В. Луканин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26, № 6. – С. 180-194. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-6-180-194. – EDN WXRKVJ.

2. Сперанская, О., Понизова, О., Цитцер, О., Гурский, Я. Пластик и пластиковые отходы в России: ситуация, проблемы и рекомендации. Международная Сеть по Ликвидации Загрязнителей (International Pollutants Elimination Network), 2021.

3. Plastic Overshoot Day – Report 2024, EA-Earth Action, 2024.

4. Bengtsson A, Bengtsson J, Olsson C, Sedin M, Jedvert K, Theliander H, Sjöholm E (2018) Improved yield of carbon fibres from cellulose and kraft lignin. *Holzforschung* 72:1007–1016.

5. E. L. Akim, Yu. G. Mandre, and A. A. Pekarets, “Changes in the relaxation state of polymeric components of wood during its high-temperature biorefining,” *Khim. Volokna*, No. 3, 14–18 (2019).

6. Перспективы технологии совместного сжигания биомассы и угля на объектах энергетики / Е. С. Дремичева, Э. Р. Зверева, Ф. И. Бурганова, Л. О. Зверев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 119-130. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-1-119-130. – EDN DRPGTC.

7. Detlef P. van Vuuren, Elke Stehfest, David E.H.J. Gernaat, Jonathan C. Doelman, Maarten van den Berg, Mathijs Harmsen, Harmen Sytze de Boer, Lex F. Bouwman, Vassilis Daioglou, Oreane Y. Edelenbosch, Bastien Girod, Tom Kram, Luis Lassaletta, Paul L. Lucas, Hans van Meijl, Christoph Müller, Bas J. van Ruijven, Sietske van der Sluis, Andrzej Tabeau, «Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm», *Global Environmental Change*, Volume 42, 2017, Pages 237-250, ISSN 0959-3780.

8. Совместная переработка отходов картонно-бумажной макулатуры, содержащих целлюлозу и синтетические полимеры, и твердых древесных отходов, входящих в состав топливного брикета / В. А. Рыжиков, Э. Л. Аким, О. А. Ерохина, А. А. Пекарец // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: Материалы VII Международной научно-технической конференции имени профессора В.И. Комарова, Архангельск, 14–16 сентября 2023 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». – RUS: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2023. – С. 65-69.

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

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

11. Forest Products Annual Market Review 2021-2022, UNECE, 70 p.; Forest Products Annual

Market Review 2019-2020 - Forestry and Timber – UNECE, 82p. ISBN 978-92-1-117257-7.

12. Ежегодный обзор рынка лесных товаров, 2018–2019 годы: Женева: ЕЭК ООН, 2020- 173с. ISBN 978-92-1-004516.

13. Forest Products Annual Market Review 2023-2024, UNECE, 53p. ISBN 978-92-1-003184-4.

14. Луканин П.В., Федорова О.В., Пекарец А.А., Аким Э.Л. Особенности сжигания биотоплива и их взаимосвязь с упруго-релаксационными свойствами исходного сырья и его химическим составом // Матер. VI Междун. научно-технич. конфер. «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов», 09-11 сентября 2021 г. Архангельск, 2021. С. 383-388.

15. Технология полимерных материалов / А.Ф. Николаев, В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов [и др.]. СПб.: Профессия, 2008. 544 с.

16. АО «ЕЭС РОССИИ» Акционерное общество открытого типа всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт (ВТИ). Тепловой расчет котлов. Издание третье, переработанное и дополненное. Санкт-Петербург, 1998.

17. Померанцев, В. В. Топки скоростного горения для древесного топлива [Текст] / канд. техн. наук В. В. Померанцев; М-во тяжелого машиностроения СССР. Главкотлотурбопром. Центр. науч.-исслед. ин-т им. И. И. Ползунова. - Москва; Ленинград: [Ленингр. отд-ние] Машгиза, 1948 (Л.: тип. "Профинтерн"). – 74 с.

18. А.А. Тринченко, А.П. Парамонов. Внедрение низкотемпературного вихревого сжигания для энергетического использования каменных углей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 4(231). 2015. – 175с

Авторы публикации

Рыжиков Владимир Александрович – ст. преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики СПбГУПТД ВШТЭ, г. Санкт-Петербург, Россия. ryzhikov_vladimir@bk.ru

Ерохина Ольга Александровна – ст. преподаватель кафедры ТЦКМ, зав. лаб. СПбГУПТД ВШТЭ, г. Санкт-Петербург, Россия.

Аким Эдуард Львович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры ТЦКМ СПбГУПТД ВШТЭ, г. Санкт-Петербург, Россия.

Луканин Павел Владимирович – д-р техн. наук, профессор, первый проректор СПбГУПТД, г. Санкт-Петербург, Россия.

References

1. Research of physical and chemical characteristics of alternative fuel containing synthetic polymers / V. A. Ryzhikov, O. A. Erokhina, E. L. Akim, P. V. Lukanin // Izvestia vysokikh uchebnykh obrazovaniya. Problems of Power Engineering. - 2024. - T. 26, № 6. - С. 180-194. - DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-6-180-194. - EDN WXRKVJ.

2. Speranskaya, O., Ponizova, O., Zitzer, O., Gursky, J. Plastic and plastic waste in Russia: situation, problems and recommendations. International Pollutants Elimination Network, 2021.

3. Plastic Overshoot Day – Report 2024, EA-Earth Action, 2024.

4. Bengtsson A, Bengtsson J, Olsson C, Sedin M, Jedvert K, Theliander H, Sjöholm E (2018) Improved yield of carbon fibres from cellulose and kraft lignin. *Holzforschung* 72:1007–1016.

5. E. L. Akim, Yu. G. Mandre, and A. A. Pekarets, “Changes in the relaxation state of polymeric components of wood during its high-temperature biorefining,” *Khim. Volokna*, No. 3, 14–18 (2019).

6. Prospects of technology of biomass and coal co-combustion at power engineering facilities / E. S. Dremicheva, E. R. Zvereva, F. I. Burganova, L. O. Zverev // Izvestiya vysokikh uchebnykh obrazovaniya. Problems of power engineering. - 2021. - T. 23, № 1. - С. 119-130. - DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-1-119-130. - EDN DRPGTC.

7. Detlef P. van Vuuren, Elke Stehfest, David E.H.J. Gernaat, Jonathan C. Doelman, Maarten van den Berg, Mathijs Harmsen, Harmen Sytze de Boer, Lex F. Bouwman, Vassilis Daioglou, Oreane Y. Edelenbosch, Bastien Girod, Tom Kram, Luis Lassaletta, Paul L. Lucas, Hans van Meijl, Christoph Müller, Bas J. van Ruijven, Sietske van der Sluis, Andrzej Tabeau, «Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm», *Global Environmental Change*, Volume 42, 2017, Pages 237-250, ISSN 0959-3780.

8. Joint processing of waste cardboard and paper waste containing cellulose and synthetic polymers and solid wood waste, which is part of the fuel briquette / V. A. Ryzhikov, E. L. Akim, O. A. Erokhina, A. A. Pekarets // Problems of mechanics of cellulose and paper materials: Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference named after Professor V. I. Komarov. I. Komarov, Arkhangelsk,

September 14-16, 2023 / Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov”. - RUS: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2023. - C. 65-69.

9. Elastic-relaxation properties of larch wood and their role in obtaining wood and charcoal briquettes / A. A. Pekarets, O. A. Erokhina, V. V. Novozhilov [et al.] // Izvestia vysokikh uchebnykh uchebnykh uchebnykh vuzdaniya. Forestry journal. - 2020. - № 1(373). - C. 200-208. - DOI 10.37482/0536-1036-2020-1-200-208. - EDN WVFHPC.

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

11. Forest Products Annual Market Review 2021-2022, UNECE, 70 p.; Forest Products Annual Market Review 2019-2020 - Forestry and Timber – UNECE, 82p. ISBN 978-92-1-117257-7.

12. Annual Forest Products Market Review, 2018-2019: Geneva: UNECE, 2020- 173 pp. ISBN 978-92-1-004516.

13. Forest Products Annual Market Review 2023-2024, UNECE, 53p. ISBN 978-92-1-003184-4.

14. Lukanin, P.V.; Fedorova, O.V.; Pekarets, A.A.; Akim, E.L. Features of biofuel combustion and their relationship with the elastic-relaxation properties of feedstock and its chemical composition // Mater. VI International Scientific and Technical Conference. “Problems of mechanics of cellulose and paper materials”, September 09-11, 2021, Arkhangelsk, 2021. C. 383-388.

15. Technology of polymeric materials / A.F. Nikolaev, V.K. Kryzhanovskiy, V.V. Burlov [et al. Burlov [et al.] SPb.: Profession, 2008. 544 c.

16. JSC UES OF RUSSIA Open Joint Stock Company All-Russian Heat Engineering Research Institute (VTI). Thermal calculation of boilers. Third edition, revised and supplemented. St. Petersburg, 1998.

17. Pomerantsev, V. V. Furnaces of high-speed combustion for wood fuel [Text] / Cand. Sci. (Techn.) V. V. Pomerantsev; Ministry of Heavy Engineering of the USSR. Glavkotloturboprom. Center. scientific-research institute named after I. I. Polzunov. I. I. Polzunov. - Moscow; Leningrad: [Leningrad Branch] Mashgiza, 1948 (L.: tip. “Profintern”). - 74 c.

18. A.A. Trinchenko, A.P. Paramonov. Implementation of low-temperature vortex combustion for power utilization of hard coal // Scientific and Technical Bulletins of St. Petersburg State Polytechnic University. 4(231). 2015. – 175c.

Authors of the publication

Vladimir A. Ryzhikov – Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg, Russia. ryzhikov_vladimir@bk.ru

Olga A. Erokhina – Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg, Russia.

Eduard L. Akim – Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg, Russia.

Pavel V. Lukanin – Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено 17.03.2025 г.

Отредактировано 31.03.2025 г.

Принято 11.04.2025 г.



ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ (ИСМДЭГТУ)

Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., Авдеев А.Д.

«Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

ele-krylova@yandex.ru

Резюме: В статье анализируется программно-аппаратный комплекс ИСМДЭГТУ, предназначенный для мониторинга и контроля состояния элементов основного технологического оборудования в сфере электроэнергетики. Система ИСМДЭГТУ предоставляет возможность оценивать текущее техническое состояние элементов газотурбинных установок (ГТУ), что существенно снижает риски внеплановых остановок, позволяет прогнозировать деградацию оборудования и разрабатывать стратегии для повышения его эффективности и продления срока службы. Особое внимание уделяется мерам, направленным на обеспечение безопасности функционирования аппаратной инфраструктуры ИСМДЭГТУ и достижению целей информационной безопасности, что становится особенно актуальным в условиях современных вызовов.

Ключевые слова: АСУ ТП; ИСМДЭГТУ; интеллектуальная система мониторинга; диагностика элементов; газотурбинные установки; ГТУ; мониторинг; диагностика.

Благодарности: Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена в рамках Указа Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. № 529 "Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий".

Для цитирования: Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., Авдеев А.Д. Интеллектуальная система мониторинга и диагностики элементов газотурбинной установки (ИСМДЭГТУ) // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 211-221. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-211-221.

INTELLIGENT SYSTEM FOR MONITORING AND DIAGNOSTICS OF GAS TURBINE INSTALLATION ELEMENTS (ISMDEGTU)

Orlov A.A., Krylova E.V., Shcherbakov V.M., Avdeev A.D.

"National Research University" «MEI», Moscow, Russia

ele-krylova@yandex.ru

Abstract: The article analyzes the software and hardware complex of ISMDEGTU, designed to monitor and control the condition of the elements of the main technological equipment in the field of electric power industry. The ISMDEGTU system provides an opportunity to assess the current technical condition of the elements of gas turbine installations (GTU), which significantly reduces the risks of unscheduled shutdowns, allows you to predict equipment degradation and develop strategies to increase its efficiency and extend its service life. Special attention is paid to measures aimed at ensuring the security of the functioning of the ISMDEGTU hardware infrastructure and achieving information security goals, which is becoming especially relevant in the context of modern challenges.

Keywords: APCS, ISMDEGTU, intelligent monitoring system; diagnostics of elements; gas turbine installations; GTU; monitoring; diagnostics.

For citation: Orlov A.A., Krylova E.V., Shcherbakov V.M., Avdeev A.D. Intelligent system for

monitoring and diagnostics of gas turbine installation elements (ISMDEGTU). *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (2): 211-221. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-211-221.

Введение (Introduction)

Современные энергетические системы (СЭС) - это сложные территориально распределённые технические объекты энергетической отрасли, созданные человеком при использовании инновационных технологий для производства, распределения, передачи, хранения и потребления электроэнергии в энергетической отрасли.

СЭС должны служить различным производственным и бытовым целям, удовлетворяя потребности конечного потребителя наименее затратным способом и тесно связаны с применением газовых турбин, в том числе газотурбинных установок большой мощности, используемых для производства электроэнергии и в различных промышленных областях. Их эффективная эксплуатация требует повышения параметров рабочего цикла, внедрения современных методов диагностики и совершенствования систем управления.

В условиях санкций отечественные производители газотурбинного оборудования [1-4] столкнулись со сложностями в приобретении современных комплексов автоматизированных систем управления технологическими процессами АСУ ТП, необходимых для удаленного мониторинга и диагностики производимых ими газотурбинных установок.

Стоимость иностранных предложений, традиционно закупаемых через посредников, в последнее время заметно возросла, процесс закупки стал занимать гораздо больше времени, а модернизация и ремонт элементов иностранных комплексов из-за санкций стал попросту невозможным.

Требования по импортозамещению также накладывают ограничения на использование иностранного оборудования и программного обеспечения, используемых в системах удаленного мониторинга и диагностики ГТУ.

Исследования проведенные в [5-16] показали сложность в создании интеллектуальных систем мониторинга и диагностики энергетических и энергоемких объектов из-за:

- **сложности оперативного анализа** и математического моделирования по причине сложности анализа пульсации в камерах сгорания и/или сложности описания газодинамических процессов, которые приводят к сложно выявляемым и быстро развивающимся критическим дефектам рабочих лопаток газовых турбин, а для построения эффективной подсистемы предиктивной аналитики как правило недостаточно имеющегося количества необходимых параметрических датчиков (вибраций, давления, температуры, и прочих параметров).

- **необходимости работы с огромными объёмами** параметрических данных, поэтому современное информационное обеспечение для решения задач управления режимами технологического объекта предоставляют большие объёмы информации, но на практике полезно используется только незначительная часть этой технологической информации.

- **сложности промышленного использования** и внедрения в генерирующую часть энергетической отрасли (из-за технологических особенностей и применяемых принципов управления в электротехнической части энергетики перейти к цифровизации проще и быстрее, чем в генерирующей, а особенно в тепловой части отрасли).

- **устаревших нормативных документов**, что приводит к проблемам в эксплуатации технологических энергетических объектов при развитии цифровизации энергетической отрасли.

- **зависимости от импорта**, что стратегически негативно отражается на безопасности энергетической отрасли в целом.

- **потребности в высококвалифицированных** управленческих кадрах, при этом от технического персонала требуется неукоснительное соблюдение технологической дисциплины, независимо от выполняемых им функций – как контроллера, так и непосредственного участника технологического процесса управления энергетическим объектом.

Разработка интеллектуальной АСУ ТП удаленного мониторинга и диагностики газовых турбин является важной задачей для обеспечения их надежности. Газотурбинные установки подвержены износу и неисправностям, что может привести к

простоям, потере производственных мощностей и значительным финансовым потерям. Традиционные методы диагностики не всегда позволяют оперативно выявлять скрытые неисправности, что требует применения более эффективных технологий мониторинга и прогнозирования отказов.

Интеллектуальные системы диагностики представляют собой сочетание передовых алгоритмов, моделей и программных средств, способных анализировать данные о состоянии газовых турбин. Использование машинного обучения, статистического анализа и методов искусственного интеллекта позволяет выявлять аномалии в работе оборудования и прогнозировать возможные неисправности. Эти системы работают в режиме реального времени, обеспечивая оперативное реагирование на изменения параметров работы турбин и предупреждая операторов о возможных проблемах.

Ключевыми аспектами работы системы являются **сбор и обработка данных** о состоянии турбин. Для этого устанавливаются сенсоры и датчики, измеряющие параметры работы, такие как температура, давление, вибрация и другие. Полученные данные передаются на центральный сервер, где анализируются с использованием специализированных алгоритмов.

Разработка интеллектуальной системы требует проведения анализа существующих методов диагностики, моделирования рабочих процессов, создания алгоритмов обработки данных и их тестирования. Необходимо определить требования к разрабатываемой системе, включая функциональные возможности, производительность, надежность и безопасность. Эти требования формируют основу для архитектуры системы и выбора подходящих технологий.

После разработки и тестирования алгоритмов следует этап внедрения в промышленные условия. Это включает в себя установку системы диагностирования на реальных объектах, обучение персонала и последующую оценку эффективности работы системы в условиях эксплуатации. Важно учитывать возможность адаптации системы к изменяющимся условиям эксплуатации, что повысит её точность и надежность.

ИСМДЭГТУ - это интеллектуальный программно-аппаратный комплекс, разработанный в рамках совместного взаимодействия кафедр АСУ ТП и АЭС ИТАЭ ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», обеспечивающий удалённое наблюдение и контроль за состоянием основного технологического оборудования в электроэнергетике. Он позволяет оценивать текущее техническое состояние ГТУ, снижать риски внеплановых остановов, прогнозировать темп деградации оборудования, определять необходимые меры для повышения эффективности и срока службы, а также планировать мероприятия по обслуживанию.

Система разработана для мониторинга газотурбинных установок, газоперекачивающих агрегатов и оборудования энергоблоков ПГУ, включая паровые турбины, генераторы и дожимные компрессоры. Информация, используемая в ИСМДЭГТУ, включает показания штатных приборов (более 3500 сигналов с каждой ГТУ, из них 600 - в режиме реального времени), отчёты по результатам предыдущего сервисного обслуживания и испытаний, а также инструкции по эксплуатации и информационные бюллетени [17].

Система применяет **различные методы диагностики**, такие как сравнительный анализ трендов и сравнение с «идеальными моделями», анализ временных рядов долгосрочных трендов и взаимосвязанных параметров, факторный анализ, оценка скорости деградации элементов и применение математических моделей оценки. Ключевые функции системы включают удалённое управление, которое позволяет воздействовать на оборудование для изменения его параметров или отключения, оценку остаточного ресурса с прогнозированием аварий и предоставлением рекомендаций по устранению неисправностей, обеспечение безопасности с использованием сертифицированных средств защиты информации, включая криптографическую защиту и контроль сетевого взаимодействия, а также хранение данных на территории РФ для обеспечения безопасности собранной информации.

Регулярный анализ данных, предоставляемых ИСМДЭГТУ, **гарантирует надёжную работу оборудования**, позволяя точно оценивать его состояние для своевременного ремонта и замены деталей. Пример обработки результатов в ИСМДЭГТУ представлен на (рис.1).

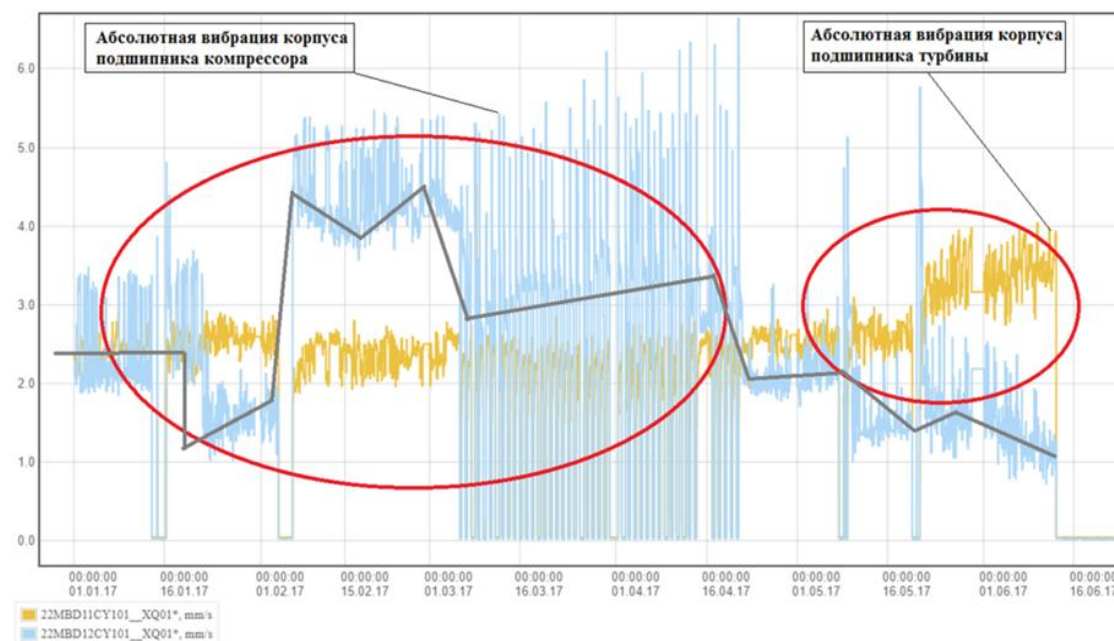


Рис. 1. Пример обработки результатов в ИСМДЭГТУ Fig. 1. An example of the results processing in ISMDEGTU

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

Особенности ИСМДЭГТУ:

- **Возможность прогнозирования.** Система позволяет прогнозировать темп деградации оборудования, определять объём необходимых воздействий для повышения эффективности и срока службы, планировать мероприятия по обслуживанию оборудования.
- **Сбор сведений.** Система получает данные от автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), управляющей газовой турбиной.
- **Передача и хранение сведений.** Передача потоковых данных от АСУ ТП на сервер аккумуляции и коммутации происходит по протоколу TCP/IP (OPC). Внутри сервера аккумуляции и коммутации данные передаются по протоколу UDP. От сервера ИСМДЭГТУ потребителям - по протоколу ГОСТ Р МЭК 60870-5-104.
- **Обработка сигналов.** Получаемые сигналы обрабатываются с помощью специального программного обеспечения, которое не входит в поставку ИСМДЭГТУ.
- **Контроль состояния и анализ отклонений.** ИСМДЭГТУ позволяет снизить риски внеплановых остановов за счёт контроля состояния и анализа отклонений, выявляемых в ходе эксплуатации оборудования.
- **Модернизация сервера аккумуляции и коммутации.** Сервер можно модернизировать так, чтобы была возможность обеспечить однонаправленную или двунаправленную передачу данных из контура АСУ ТП.

Таблица 1 содержит мероприятия по информационной безопасности для Интеллектуальной системы управления мониторинга и диагностики (ИСМДЭГТУ). Прежде всего, важным аспектом является контроль физического доступа, который гарантирует защиту аппаратной инфраструктуры ИСМДЭГТУ от несанкционированного доступа.

Кроме того, установка и администрирование системы должны строго соответствовать политике информационной безопасности [18], установленной субъектом электроэнергетики. Это позволяет обеспечить надежную защиту данных на всех уровнях системы.

Также необходимо повысить осведомленность администраторов, которые должны пройти специальные обучающие курсы и получить сертификаты, что включает в себя глубокие знания о требованиях безопасности, действующих в России.

Наконец, важно четко определить роль администратора информационной безопасности в организационной структуре, что должно сопровождаться обязательным соблюдением установленного штатного расписания. Все эти мероприятия способствуют созданию надежной системы защиты информации в ИСМДЭГТУ.

Таблица 1

Table 1

Минимальный комплекс мероприятий для обеспечения безопасности среды функционирования аппаратной инфраструктуры ИСМДЭГТУ организационных требований к обеспечению информационной безопасности аппаратной инфраструктуры ИСМДЭГТУ

The minimum set of measures to ensure the security of the environment of the ISMDEGTU hardware infrastructure and organizational requirements for ensuring the information security of the ISMDEGTU hardware infrastructure

№ п/п	Мероприятие	Описание
1	Контроль физического доступа	В местах размещения аппаратной инфраструктуры ИСМДЭГТУ должен быть обеспечен контроль физического доступа.
2	Безопасная установка	Процесс установки, инсталляции и администрирования аппаратной инфраструктуры, программного обеспечения ИСМДЭГТУ должен соответствовать требованиям политики информационной безопасности, утвержденной собственником или иным законным владельцем объекта электроэнергетики. Контроль соответствия требований информационной безопасности осуществляется субъектом электроэнергетики.
3	Повышение осведомленности	Администраторы ИСМДЭГТУ должны пройти обучение способам администрирования программного обеспечения и получить сертификат об окончании обучения. В составе программы обучения должны входить мероприятия по получению знаний и навыков реализации требований информационной безопасности, действующих в Российской Федерации.
4	Администрирование безопасности	В рамках организационной структуры подразделения, эксплуатирующего программное обеспечение, должна быть предусмотрена роль администратора информационной безопасности. Роль администратора информационной безопасности должна быть регламентирована и утверждена субъектом электроэнергетики. В качестве исполнителя роли администратора информационной безопасности может быть только сотрудник объекта в соответствии со штатным расписанием.

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

Таблица 2

Table 2

Описание целей информационной безопасности ИСМДЭГТУ, организационных требований к обеспечению контроля информационной безопасности ИСМДЭГТУ

Description of the information security objectives of ISMDEGTU, organizational requirements for ensuring information security control of ISMDEGTU

№ п\п	Цель информационной безопасности	Идентификатор	Описание
1.	Аудит событий	O.AUDITING	Программное обеспечение должно обеспечивать: а) генерацию, запись и хранение событий информационной безопасности относящихся к функционированию встроенных средств защиты (при этом генерация, запись и хранение событий информационной безопасности должны осуществляться за счет инфраструктуры, расположенной на территории Российской Федерации); б) защиту данных журналов (доступ к журналам разрешен пользователям, имеющим право допуска, правила получения, которого устанавливаются субъектом электроэнергетики). Информация, хранящаяся в журналах, должна содержать: а) дату (день, месяц и год) и время (часы, минуты, секунды) произошедшего события информационной безопасности, идентификационные данные пользователя, от имени которого совершалось действие или был запущен процесс, повлекший наступление события информационной безопасности; б) подробное описание предпринимаемых действий для последующего их анализа, выявления попыток несанкционированного доступа или несанкционированной модификации компонент программного обеспечения.
2.	Криптографическая защита	O.CRYPTO	Программное обеспечение должно обеспечивать целостность и конфиденциальность информации. Целостность и конфиденциальность информации обеспечиваются средствами криптографической защиты. Удаленное соединение должно обеспечиваться совместно со средствами криптографической защиты. В рамках открытых сессий обмена данными должны использоваться средства криптографической защиты. В случае с распределенной сетью хранения и получения данных должны использоваться средства криптографической защиты.
3.	Дискретный доступ	O.DACCESS	Программное обеспечение должно осуществлять контроль доступа персонала на основе идентификаторов объектов. Доступ к объектам пользователей должен осуществляться на основании правил доступа персонала к объектам.
4.	Контроль сетевого взаимодействия	O.NFLOW	Программное обеспечение должно осуществлять контроль взаимодействия и передачи информации между сетевыми интерфейсами (в том числе виртуальными), между субъектами, между внутренними функциями на основании настраиваемой политики безопасности в рамках функций ИСМДЭГТУ.

5.	Передача атрибутов безопасности	O.SUBJECT	При взаимодействии пользователей программное обеспечение должно обеспечивать передачу атрибутов безопасности в соответствии с настраиваемой политикой безопасности.
6.	Идентификация и аутентификация	O.I&A	Программное обеспечение должно обеспечивать идентификацию и аутентификацию пользователей для любых действий на основе сертификата открытого ключа подписи и связанного с ним закрытого ключа подписи, размещенного на отчуждаемом носителе. Доступ к программному обеспечению ИСМДЭГТУ должен предоставляться только авторизованным пользователям. Должна быть обеспечена многофакторная аутентификация с использованием доступных для субъектов электроэнергетики средств.
7.	Конфигурация безопасности	O.MANAGE	Программное обеспечение должно содержать необходимые механизмы для управления и настройки всех имеющихся функций безопасности. Доступ к этим механизмам должен быть обеспечен только авторизованным пользователям с выделенной ролью администратора информационной безопасности. Программное обеспечение должно иметь возможность указывать на ошибки персонала при конфигурации, а также должно запрещать возможность снижения уровня безопасности. Применяемые средства защиты информации должны соответствовать пунктам 19-22 Требований к созданию систем безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и обеспечению их функционирования, утвержденных приказом ФСТЭК России от 21.12.2017 №235 (зарегистрирован Минюстом России 22.02.2018, регистрационный № 50118).
8.	Установление защищенных соединений	O.TRUSTCHAN	Программное обеспечение должно быть спроектировано и разработано таким образом, чтобы позволять установление защищенного соединения с информационными системами того же класса доверия, гарантируя при этом целостность, доступность и конфиденциальность передаваемых в рамках соединения данных, взаимную авторизацию и возможность обмена атрибутами безопасности.

9.	Доступность	O.AVAIL	Функционирование программного обеспечения должно осуществляться на постоянной основе. В случае выходов из строя каналов связи функционирование программного обеспечения должно продолжаться. Должны быть предусмотрены механизмы обеспечения продолжения функционирования при переполнении баз данных. Должен осуществляться контроль целостности компонентов ИСМДЭГТУ в процессе их загрузки и эксплуатации. Должно быть исключено неконтролируемое, несанкционированное вмешательство в процессы перезагрузки или восстановления после сбоев компонентов программного обеспечения ИСМДЭГТУ. В процессе функционирования программного обеспечения ИСМДЭГТУ должны быть предусмотрены на периодической основе проверки на наличие уязвимостей компонентов программного обеспечения ИСМДЭГТУ. Должны быть предусмотрены возможности восстановления данных и (или) параметров конфигураций компонентов программного обеспечения ИСМДЭГТУ из резервных копий в случае их компрометации, уничтожения, ошибочного изменения, замены аппаратного обеспечения ИСМДЭГТУ. Должны быть предусмотрены возможности создания резервных копий в случае внесения изменений в конфигурации, с заданной периодичностью или комбинации этих вариантов персоналом субъекта электроэнергетики вручную или автоматически с использованием прикладного программного обеспечения.
----	-------------	---------	---

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

Криптографическая защита играет свою незаменимую роль, обеспечивая целостность и конфиденциальность данных [18]. Она использует современные средства для защиты удаленных соединений и обмена информацией в распределенных сетях. Дискретный доступ контролирует доступ персонала к объектам на основе их идентификаторов и установленных правил, что способствует повышению уровня безопасности.

Контроль сетевого взаимодействия включает в себя внимательное мониторингирование передачи информации между сетевыми интерфейсами и внутренними функциями, строго следуя установленной политике безопасности. Передача атрибутов безопасности обеспечивает соблюдение правил при взаимодействии пользователей, создавая тем самым защитную оболочку для операций.

Идентификация и аутентификация требуют внедрения сертификатов и многофакторной аутентификации, что позволяет надежно авторизовывать действия пользователей. В завершение, конфигурация безопасности включает механизмы управления функциями безопасности, доступ к которым ограничивается администраторам. Это необходимо для предотвращения ошибок конфигурации и снижения уровня безопасности, при этом все действия строго соответствуют требованиям ФСТЭК России.

Выводы (Conclusions)

- Статья акцентирует внимание на важности программно-аппаратного комплекса ИСМДЭГТУ для эффективного управления состоянием элементов газотурбинных установок в энергетической и других сферах.
- Внедрение данного комплекса не только обеспечивает возможность мониторинга и контроля, но и значительно снижает риски внеплановых остановок, что крайне важно для стабильности энергетических систем.
- Гарантия безопасности работы аппаратной инфраструктуры ИСМДЭГТУ и достижение целей информационной безопасности становятся ключевыми задачами в условиях современных вызовов, включая киберугрозы.

Литература

1. Соколов В.С. Газотурбинные установки. – М.: Высшая школа, 1986 – 151 с.
2. Вибрационный контроль технического состояния газотурбинных

газоперекачивающих агрегатов / Ю.Н. Васильев, М.Е. Бесклетный, Е.А. Игуменцев и др. – М.: Недра, 1987 – 197 с.

3. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987 – 288 с.

4. Вибромониторинг и диагностика – основа достоверной информации о состоянии ГПА / С. Зарицкий, А. Стрельченко, В. Тимофеев и др. // Газотурбинные технологии. – 2000 – Л. – С. 24-26.

5. L. Enochson, G.Smith. Examples of Digital Data Analysis for Rotating Machinery. Presented at National Conference on Power Transmission. Philadelphia, Pennsylvania. 1978 GenRad, Application Note 13, pp. 7.

6. Fentaye A.D., Baheta A.T., Gilani S.I., Kyprianidis K.G. A Review on Gas Turbine Gas-Path Diagnostics: State-of-the-Art Methods, Challenges and Opportunities. Aerospace, 2019, vol. 6, no. 7, p. 83. DOI: 10.3390/aerospace6070083

7. Sieciński S., Kostka P.S., Tkacz E.J. Heart rate variability analysis on electrocardiograms, seismocardiograms and gyrocardiograms on healthy volunteers. Sensors, 2020, vol. 20, no. 16, pp. 4522. DOI: 10.3390/s20164522

8. Щербаков, В. М. Интеллектуализация автоматизированного параметрического диагностирования элементов газотурбинных двигателей (ГТД) большой мощности / В. М. Щербаков, Е. А. Пыткина // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Тезисы докладов Тридцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 29 февраля – 02 2024 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2024. – С. 1040. – EDN LPWKMG.

9. Интеллектуальная Система автоматического управления технологическими режимами работы энергоемкого агрегата / А. А. Орлов, Е. В. Крылова, В. М. Щербаков [и др.] // Электротехническая сталь 2024 : Сборник материалов научно-технической конференции, Москва, 30–31 мая 2024 года. – Москва: Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС", 2024. – С. 13-14. – EDN UACGKN.

10. Применение отечественного микроконтроллера МИК-32 при автоматизации диагностического оборудования в теплоэнергетике / А. А. Орлов, Е. В. Крылова, А. В. Сириченко [и др.] // Проблемы современной теплоэнергетики : сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию специальности «Промышленная теплоэнергетика» в ЛГТУ, 70-летию Липецкой области и 90-летию Новолипецкого металлургического комбината, Липецк, 06 декабря 2024 года. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью "Бук", 2024. – С. 192-199. – EDN CVRHVD.

11. Мацко, К. О. Анализ применимости системы прогностического обслуживания и ремонта по состоянию для АСУТП объектов энергетики / К. О. Мацко // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Тезисы докладов Двадцать девятой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 16–18 марта 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2023. – С. 922. – EDN HWAЕЕМ.

12. Автоматизированная система производственного неразрушающего контроля / А. Н. Рыков, О. Н. Будадин, С. Н. Сычугов [и др.] // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2020. – № 4. – С. 8-16. – DOI 10.25791/asu.4.2020.1172. – EDN MZSYSH.

13. Исследование возможности КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ многопараметрового неразрушающего контроля сложных конструкций / А. А. Бекаревич, О. Н. Будадин, В. И. Крайний, А. Н. Пичугин // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 2. – С. 75-80. – EDN PWCSXT.

14. Бекаревич, А. А. Исследование возможности автоматизированной дефектоскопии материалов с распознаванием малоразмерных дефектов в условиях неопределенности их формы / А. А. Бекаревич, О. Н. Будадин, А. Н. Пичугин // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 3. – С. 29-33. – EDN PXHUXB.

15. Бекаревич, А. А. Обнаружение дефектов сложных конструкций на основе комплексирования информации многопараметрового неразрушающего контроля / А. А. Бекаревич // Цветные металлы. – 2013. – № 3(843). – С. 82-88. – EDN PXVXKH.

16. Крайний, В. И. Оптимизация многопараметрового неразрушающего контроля материалов, конструкций и объектов / В. И. Крайний, О. Н. Будадин, А. А. Бекаревич // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. – 2012. – № 8(8). – С. 26. – EDN QZPOGN.

17. Турбины газовые. Сбор данных и требования к системе контроля изменений

для газотурбинных установок. – М.: Стандартинформ, 2017. – 42 с.

18. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 6 ноября 2018 г. № 1015 “Об утверждении требований в отношении базовых (обязательных) функций и информационной безопасности объектов электроэнергетики при создании и последующей эксплуатации на территории Российской Федерации систем удаленного мониторинга и диагностики энергетического оборудования”. [Электронный ресурс].

Авторы публикации

Орлов Антон Андреевич – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. АСУ ТП. OrlovAA@mpei.ru

Крылова Елена Владимировна – канд. пед. наук, доцент, доцент каф. АЭС. ele-krylova@yandex.ru

Щербakov Владислав Михайлович – аспирант каф. АСУ ТП. ShcherbakovVM@mpei.ru

Авдеев Андрей Денисович – студент каф. АСУ ТП. AvdeevADen@mpei.ru

References

1. Sokolov B.C. Gas turbine installations. – М.: Higher School, 1986 – 151 p.
2. Vibration control of the technical condition of gas turbine gas pumping units / Yu.N. Vasiliev, M.E. Beskletny, E.A. Igumentsev et al. – М.: Nedra, 1987 – 197 p.
3. Genkin M.D., Sokolova A.G. Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms. Moscow: Mashinostroenie, 1987 – 288 p.
4. Vibration monitoring and diagnostics – the basis of reliable information about the state of the GPA / S. Zaritsky, A. Strelchenko, V. Timofeev et al. // Gas turbine technologies. – 2000 – L. – S. 24-26.
5. L. Enochson, G. Smith. Examples of Digital Data Analysis for Rotating Machinery. Presented at the National Conference on Power Transmission. Philadelphia, Pennsylvania. 1978 GenRad, Application Note 13, pp. 7.
6. Fentaye A.D., Baheta A.T., Gilani S.I., Kyprianidis K.G. A Review on Gas Turbine Gas-Path Diagnostics: State-of-the-Art Methods, Challenges and Opportunities. Aerospace, 2019, vol. 6, no. 7, p. 83. DOI: 10.3390/aerospace6070083
7. Sיעiński S., Kostka P.S., Tkacz E.J. Heart rate variability analysis on electrocardiograms, seismocardiograms and gyrocardiograms on healthy volunteers. Sensors, 2020, vol. 20, no. 16, pp. 4522. DOI: 10.3390/s20164522
8. Shcherbakov, V. M. Intellectualization of automated parametric diagnostics of high-power gas turbine engine elements / V. M. Shcherbakov, E. A. Pytkina // Radio electronics, electrical engineering and power engineering : Abstracts of the Thirtieth International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates, Moscow, February 29 – 02, 2024. – Moscow: Limited Liability Company "Center of printing services "RADUGA", 2024. – p. 1040. – EDN LPWKMG.
9. Intelligent automatic control system for technological modes of operation of an energy-intensive unit / A. A. Orlov, E. V. Krylova, V. M. Shcherbakov [et al.] // Electrotechnical steel 2024 : Proceedings of the scientific and technical conference, Moscow, May 30-31, 2024. – Moscow: National Research Technological University "MISIS", 2024. – pp. 13-14. – EDN UACGKN.
10. Application of the domestic microcontroller MIK-32 in automation of diagnostic equipment in thermal power engineering / A. A. Orlov, E. V. Krylova, A.V. Sirichenko [et al.] // Problems of modern thermal power engineering : proceedings of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 50th anniversary of the specialty "Industrial thermal Power Engineering" at LGTU, the 70th anniversary of Lipetsk the region and the 90th anniversary of the Novolipetsk Metallurgical Plant, Lipetsk, December 06, 2024. Kazan: Buk Limited Liability Company, 2024. pp. 192-199. EDN CVRHVD.
11. Matsko, K. O. Analysis of the applicability of predictive maintenance and repair systems for automated control systems of energy facilities / K. O. Matsko // Radio electronics, electrical engineering and power engineering : Abstracts of the Twenty-ninth International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates, Moscow, March 16-18, 2023. – Moscow: Limited Liability Company "Center of printing services "RADUGA", 2023. – p. 922. – EDN HWAEEM.
12. Automated system of industrial non-destructive testing / A. N. Rykov, O. N. Budadin, S. N. Sychugov [et al.] // Industrial automated control systems and controllers. – 2020. – No. 4. – pp. 8-16. – DOI 10.25791/asu.4.2020.1172. – EDN MZSYSH.
13. A. A. Bekarevich, O. N. Budadin, V. I. Krainy, A. N. Pichugin, A. N. Pichugin, A study of

the possibility of INTEGRATING INFORMATION of multiparameter non-destructive testing of complex structures. Diagnostics. – 2013. – No. 2. – pp. 75-80. – EDN PWCSXT.

14. Bekarevich, A. A. Investigation of the possibility of automated flaw detection of materials with the recognition of small-sized defects in conditions of uncertainty of their shape / A. A. Bekarevich, O. N. Budadin, A. N. Pichugin // Control. Diagnostics. – 2013. – No. 3. – pp. 29-33. – EDN PXHUXB.

15. Bekarevich, A. A. Detection of defects in complex structures based on the integration of information from multiparameter non-destructive testing / A. A. Bekarevich // Non-ferrous metals. – 2013. – № 3(843). – Pp. 82-88. – EDN PXVXKH.

16. Krainy, V. I. Optimization of multiparameter non-destructive testing of materials, structures and objects / V. I. Krainy, O. N. Budadin, A. A. Bekarevich // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. – 2012. – № 8(8). – P. 26. – EDN QZPOGN.

17. Gas turbines. Data collection and requirements for a change control system for gas turbine installations. Moscow: Standartinform, 2017. 42 p.

18. Order No. 1015 of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated November 6, 2018 "On Approval of Requirements for Basic (Mandatory) Functions and Information Security of Electric Power Facilities during the Creation and Subsequent Operation of Remote Monitoring and Diagnostic Systems for Power Equipment in the Russian Federation". [electronic resource].

Authors of the publication

Anton A. Orlov - "National Research University" «MEI», Moscow, Russia.
OrlovAA@mpei.ru

Elena V. Krylova, Elena - "National Research University" «MEI», Moscow, Russia.. [ele-krylova@yandex.ru](mailto:elkrylova@yandex.ru)

Vladislav M. Shcherbakov - "National Research University" «MEI», Moscow, Russia..
ShcherbakovVM@mpei.ru

Andrey D. Avdeev - "National Research University" «MEI», Moscow, Russia..
AvdeevADen@mpei.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **12.03.2025 г.**

Отредактировано **31.03.2025 г.**

Принято **15.04.2025 г.**