Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы

1997 жылдан бастап шығады

ВЕСТНИК Торайгыров университета

Энергетическая серия

Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№3 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО
о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж
выдано
Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность
публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/ISSN2710-3420
Бас редакторы – главный редактор
Талипов О. М.
доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)
Заместитель главного редактора Калтаев А.Г., *доктор PhD*
Ответственный секретарь Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*
Алиферов А. И., *д.т.н., профессор (Российская Федерация)*
Кошеков К. Т., *д.т.н., профессор*
Приходько Е. В., *к.т.н., профессор*
Кислов А. П., *к.т.н., доцент*
Нефтисов А. В., *доктор PhD*
Шерьязов С. К. т.ғ.д., *профессор (Российская Федерация)*
Искакова З. С. *технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

МАЗМҰНЫ
СОДЕРЖАНИЕ
CONTENT

Абылкаиров Т. М., Бектимиров А. Т.
Обзор методов оптимизации режимов электроэнергетических систем с использованием устройств FACTS 7
Айтмагамбетова Г. А., Никифоров А. С.
Анализ влияния теплопотерь печи прокалки на энергоэффективность комплекса производства прокаленного кокса 27
Акаев А. М., Миргородский С. И., Толеубеков Е. К.
Модернизация газовых турбин до ПГУ для увеличения выработки электроэнергии в Республике Казахстан 42
Апсеметова А. Т., Шыныбай Ж. С., Арыстанбаев К. Е., Чимкентбаева Р. М.
Применение линейной мультипликативной модели для анализа и прогнозирования электропотребления городских распределительных сетей 58
Арпиш А. А., Минажова С. А.
Анализ комбинированных методов минимизации обледенения ветроэнергетических установок 72
Aubakirova A. M., Neftissov A. V., Orazbay M. N., Biloshchytskyi A. A., Honcharenko T. A.
Development of a delta-based XGBoost model for forecasting reservoir storage dynamics 91
Әкімбек Г. Ә., Каримолданова М. А., Алияров Б. К., Калкабаева Г. У.
Совершенствование конструкции шаровой мельницы для повышения энергоэффективности и износостойкости 114
Барукин А. С., Динмуханбетова А. Ж., Машрапов Б. Е., Талипов О. М.
Оценка надёжности схемы ОРУ-500 кВ атомной электростанции методом дерева отказов 131
Байжанов К. А., Исенов С. С., Исабеков Д. Д.
Сравнительный анализ технологий стабилизации мощности ветровой генерации в изолированных энергосистемах нефтегазовых объектов 146

Beisenbi M. A., Shamken N. B., Bekenov T. N.
Synthesis of self-organizing control for MIMO systems via structurally stable mappings 166
Bekbolatova Zh., Grigoryev D. V., Nurymov A., Kuatzhanov Zh.
Intelligent forecasting of renewable generation for deficit reduction and grid stability 181
Воронков В. В., Раделюк И. М.
Разработка гибридизированной модели оптимизации водного следа на промышленных предприятиях 198
Габыл-Манапова Ф. А., Бекбаев А. Б., Абитаева Р. Ш., Ишангалиева А. Ф.
Исследование гололедообразования на высоковольтных линиях электропередачи и его влияния 214
Даутов С. С., Кангожин Б. Р., Жармагамбетова М. С., Сатенова М. Б.
Высокочастотные помехи в цепях РЗА электрической подстанции 220 кВ при коротких замыканиях 233
Добренко М. А., Корамбаев Д. Р., Хажин И. А., Ярославцев М. В., Азаматов М. Т.
Синтез системы управления мощностью источников энергии электромобиля с питанием от фотоэлектрического преобразователя 255
Жакишев Б. А., Кокаев У. Ш., Жумажанов С. К., Килибаев Е. О., Баимбетов Н. А.
Особенности процесса таяния снега в снегоплавильной машине при прямом воздействии пламени 268
Жантлесова А. Б., Умурзакова А. Д., Еруланова А. Е., Мади П. Ш., Калтаев А. Г.
Определение обобщенных параметров энергосистемы методом диакоптики 280
Ибрагимова С. В., Старчеус А. Н., Кирий П. В., Айтуарова М. Т.
Реализация архитектурных принципов виртуальных электростанций при моделировании энергосистем со смешанным типом генерации 293
Исабеков Ж. Б., Исабекова Б. Б., Шимпф А. А., Есмаханова Л. Н., Ордабаев Б. Е.
Метод определения однофазных замыканий на землю с применением технологий интернета вещей 310

Исатаев М. С., Бектибай Б. Ж., Сейдулла Ж. К., Амир Б. Т., Кунтубаева Ж. Г.
ВЭУ с коаксиальными валами и обгоняющей муфтой 30° для повышения стартовых характеристик 322
Kazambaev I. M., Mekhtiyev A. D., Zhalmagambetova U. K., Kylyshkozha N. N.
Development of a model of a fiber-optic monitoring system 340
Карманов А. Е., Габдулов А. У., Арипова Н. М., Плевако А. П., Баянова А. К.
Разработка устройства для утилизации угольных отходов с низким содержанием горючих веществ 353
Kydyrov N. S., Kaverin V. V., Yurchenko A. V.
Study of emergency situations on high and ultra-high voltage power lines 365
Меирбекова О. Д., Рустамов Н. Т., Бергузинов А. Н., Тулебаева Г. А., Бабахан Ш. А.
Гибридная газотурбинная установка с водяным аккумулятором на биогазе 384
Merzadinova G. T., Kopysheva A. K.
Enhancing the efficiency of high-temperature coal combustion through the modernization of crushing units 401
Мустафина Р. М., Сағындық Ә. Б., Бектасова А. А., Ергалиев А. Б., Тастенов А. Д.
Торайғыров университетіне 65 жыл. Энергетика факультетіндегі оқу-әдістемелік жұмыс. Үрдістер мен инновациялар 421
Налибаев О. Ш., Сарсенбаев Е. А., Ерқоңыр Ә. К.
Конструктивная оптимизация активной части распределительного трансформатора ТМГвэ-630/10-0,4 как метод снижения энергетических потерь 442
Омар Д. Р., Омаров Р. А., Умбетов Е. С., Демесова С. Т., Молдыбаева Н. И.
Экономические аспекты применения солнечной энергии в производственных процессах агросектора Казахстана 455
Орман И. М., Искаков К. Т.
Интерпретация радарограмм данных георадара методом зондирования 475
Починок С. Ф., Обозов А. Д., Лаврентьев А. В., Ромадин А. Ю.
Управление режимами барботажного перемешивания в анаэробном биореакторе 499

Suleymenova G., Uakhitova A., Bainiyazov B.
Optimisation of 110 kV network operating modes using reactive power flow control 512
Тютебаева Г. М., Саракешова Н. Н., Мергалиев Н. Т., Катранова Г. С., Жумалиева А. К.
Перевод водогрейных котлов ТЭЦ-2 г. Астаны на сжигание природного газа 526
Хамбар Б., Рахметова А. М.
Энергетический сектор Казахстана: вызовы и возможности достижения целей устойчивого развития 540

Авторлар туралы ақпарат
Сведения об авторах
Information about the authors 560

Авторларға арналған ережелер
Правила для авторов
Rules for authors 599

Жарияланым этикасы
Публикационная этика
Publication ethics 610

МРНТИ 44.29.29
https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/7-26

****Т. М. Абылкаиров[1], А. Т. Бектимиров[2]***
[1,2]Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы;
[2]R&D Power Grid Automation, Республика Казахстан, г. Алматы.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2523-8513
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5609-6206
*e-mail: t.abylkairov@aues.kz

ОБЗОР МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВ FACTS

В последние десятилетия стремительный рост спроса на электроэнергию привёл к эксплуатации электрических сетей в режимах, близких к предельно допустимым по пропускной способности, что сопровождается увеличением потерь мощности, снижению запасов устойчивости, а также снижением качества и надёжности электроснабжения. Устройства FACTS рассматриваются как один из наиболее эффективных инструментов повышения управляемости и эксплуатационной эффективности электроэнергетических систем.

Несмотря на значительный объём исследований, посвящённых применению устройств FACTS, существующая литература характеризуется фрагментарностью: различные работы используют несопоставимые целевые функции, неоднородные постановки задач и отличающиеся критерии оценки эффективности, что затрудняет системное сравнение результатов и формирование единых обобщённых выводов. Кроме того, отсутствует единый подход к классификации задач оптимизации с точки зрения их влияния на режимы работы энергосистем.

В настоящей статье предлагается систематизированный и критический обзор методов повышения эффективности функционирования электроэнергетических систем с использованием устройств FACTS. В отличие от существующих работ, особое внимание уделено структурированной классификации подходов на основе целевых функций оптимизации. Проведён углублённый

сравнительный анализ, направленный на выявление сильных и слабых сторон различных методов оптимизации, а также их применимости в задачах различной размерности и сложности.

Научный вклад работы заключается в формировании единой рамочной классификации целевых функций оптимизации для задач размещения FACTS, выявлении ключевых методологических ограничений существующих подходов и определении перспективных направлений дальнейших исследований.

Ключевые слова: устройства FACTS, методы оптимизации, целевые функции оптимизации, метаэвристические алгоритмы, электроэнергетические системы.

Введение

Рост зависимости экономики от надёжности и качества электроснабжения, наряду с увеличением электрических нагрузок, привёл к эксплуатации электроэнергетических систем в режимах, близких к предельно допустимым по пропускной способности. Конкурентное давление на субъекты электроэнергетики, ориентированные на снижение стоимости электроэнергии, дополнительно усиливает загрузку сетевой инфраструктуры. При этом неравномерное распределение нагрузок в сети приводит к ухудшению профиля напряжения, росту потерь активной мощности и снижению запасов устойчивости, а также повышает чувствительность системы к коротким замыканиям.

В результате современные электроэнергетические системы сталкиваются с такими проблемами, как перегрузка линий электропередачи, отклонения напряжения от допустимых значений, увеличение потерь мощности и ухудшение динамической устойчивости системы. Для эффективного управления режимами и повышения пропускной способности сети без существенной реконструкции инфраструктуры широко применяются устройства FACTS [1].

Эффективность устройств FACTS в управлении режимами электроэнергетических систем подтверждена многочисленными исследованиями. Однако их высокая стоимость требует обоснованного выбора типа, мощности и места установки, поскольку неэффективные решения могут нивелировать экономический эффект. В этой связи применение методов оптимизации является ключевым условием обеспечения технико-экономической эффективности, направленным на оптимальное размещение устройств FACTS и повышение эффективности функционирования энергосистем.

В последние годы опубликовано множество обзоров по оптимальному размещению устройств FACTS, однако большинство из них ограничено отдельными целевыми функциями (устойчивость, потери, затраты). Комплексный подход, учитывающий совокупность целей оптимизации, по-прежнему отсутствует.

В работе представлен системный обзор целевых функций оптимизации размещения устройств FACTS. Предложена структурированная классификация по типам устройств, методам оптимизации и достигаемым эффектам, а также классификация методов по их характеристикам и ограничениям, что позволяет обоснованно выбирать тип FACTS и метод оптимизации в зависимости от задачи.

Материалы и методы

1 Классификация устройств FACTS и методов оптимизации

Рост нагрузок и требования к эффективности электроэнергетических систем, при высоких капитальных затратах на развитие сетей, приводят к перегрузкам, потерям, ухудшению профиля напряжения и снижению устойчивости. В этих условиях устройства FACTS широко применяются для повышения эффективности и управляемости режимов энергосистем.

Устройства FACTS условно делятся на два поколения: первое – на базе тиристорного управления (SVC, TCSC, TCPS), второе – на основе полностью управляемых полупроводников (GTO, IGBT), включающее STATCOM, SSSC, UPFC, IPFC и другие.

В зависимости от способа подключения к электроэнергетической системе устройства FACTS могут быть классифицированы на четыре основные категории, как показано на рисунке 1:

- Последовательные устройства FACTS;
- Параллельные устройства FACTS;
- Последовательно-последовательные устройства FACTS;
- Последовательно-параллельные устройства FACTS.

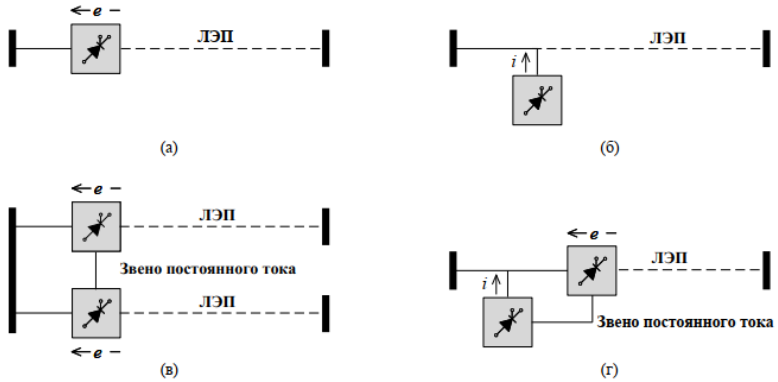


Рисунок 1 – Классификация устройств FACTS в зависимости от способа подключения к электроэнергетической системе. (а) последовательные; (б) параллельные; (в) последовательно-последовательные; (г) последовательно-параллельные

Высокая стоимость устройств FACTS требует оптимального выбора их типа, параметров и мест установки на основе методов оптимизации [2]. В зависимости от числа целей выделяют одноцелевые и многокритериальные методы; последние подразделяются на методы с доминированием и без него, где компромисс формируется на основе множества Парето-оптимальных решений. Методы оптимизации также могут быть классифицированы по этапам их развития на три основные группы: классические аналитические методы, классические алгоритмы математического программирования и современные метаэвристические алгоритмы, как показано на рисунке 2.

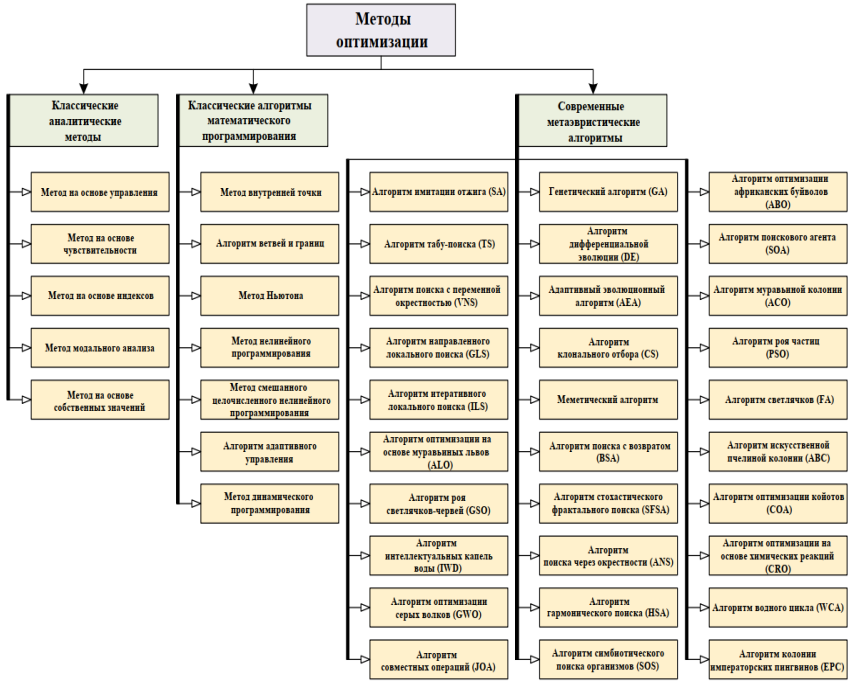


Рисунок 2 – Классификация методов оптимизации

Аналитические методы эффективны, но применимы к задачам малой размерности. Методы математического программирования обеспечивают сходимость, однако ограничены при большом числе ограничений. Метаэвристические алгоритмы наиболее универсальны и позволяют эффективно решать многокритериальные задачи с получением множества альтернативных решений.

2 Целевые функции оптимизации для повышения эффективности режимов работы электроэнергетических систем

К основным целям оптимизации относятся снижение перегрузок в сети, уменьшение потерь активной мощности, оптимизация затрат, повышение надёжности и устойчивости энергосистемы, улучшение профиля напряжения, повышение динамической устойчивости, обеспечение устойчивости частоты, оптимизация распределения реактивной мощности, а также снижение

выбросов парниковых газов. Указанные цели подробно рассмотрены в последующих подразделах.

2.1 Снижение перегрузок в сети

В условиях либерализованного рынка электроэнергии участники стремятся минимизировать затраты при обеспечении надёжного энергоснабжения, что усиливается ростом нагрузок и усложнением структуры сети. Подключение новых потребителей и источников генерации приводит к увеличению числа возможных аварийных и послеаварийных режимов, вследствие чего энергосистемы всё чаще эксплуатируются вблизи предельно допустимых по устойчивости и пропускной способности состояний.

Это сопровождается перегрузками линий, ростом потерь мощности, ухудшением показателей надёжности и ограничением передачи электроэнергии. В таких условиях требуется применение эффективных средств управления перетоками мощности и режимами работы сети.

Использование устройств FACTS и их оптимальное размещение позволяют повысить пропускную способность сети, улучшить управляемость режимов и снизить перегрузки. Благодаря высоким динамическим характеристикам устройства FACTS эффективно регулируют потокораспределение, обеспечивая повышение устойчивости и технико-экономической эффективности функционирования электроэнергетических систем.

В работе [3;4] предложен подход к снижению перегрузок в сети на основе оптимального размещения устройств SVC, TCSC, и UPFC с использованием методов собственных значений и чувствительности.

В работе [5] предложена многокритериальная постановка задачи снижения перегрузок, в которой основной целевой функцией является стоимость управления перегрузками, а дополнительными – показатели динамической устойчивости напряжения. Для оптимизации используется метод нелинейного программирования, а выбор компромиссного решения осуществляется на основе модифицированного ε-ограничения с последующей нечёткой оценкой.

2.2 Оптимизация затрат

Обеспечение требуемого уровня качества и надёжности электроснабжения при ограниченных затратах является сложной задачей. В условиях конкурентного рынка производители и потребители стремятся снизить стоимость электроэнергии при сохранении заданных показателей качества. Тарифы на электроэнергию напрямую влияют на себестоимость продукции и экономику в целом, что усиливает актуальность задач оптимизации затрат. Снижение стоимости электроэнергии повышает её доступность, стимулирует рост потребления и способствует социально-экономической устойчивости.

В ряде исследований снижение затрат достигается за счёт оптимального размещения устройств FACTS. В работе [6] метод чувствительности применяется для размещения последовательных устройств FACTS с целью снижения стоимости генерации и повышения пропускной способности сети. В [7] применяется гибридный подход, сочетающий методы биогеографической оптимизации и нелинейного программирования, для анализа экономической эффективности применения устройств TCSC и SVC.

В работе [8] генетические и гибридные алгоритмы (включая иммунный GA и PSO, а также алгоритм GRASP) используются для оптимального размещения FACTS с целью снижения затрат генерации и повышения надёжности.

В работе [9] исследуется влияние размещения устройств TCSC, SVC и UPFC на снижение инвестиционных затрат, загрузки линий и отклонений напряжения с использованием методов BBO, PSO и WIPSO.

2.3 Снижение потерь мощности

Потери активной мощности увеличивают затраты на производство электроэнергии и её удельную стоимость. При преобладании генерации на ископаемом топливе они также ведут к неэффективному использованию ресурсов и росту выбросов. Снижение потерь является ключевым фактором повышения энергоэффективности, экономической эффективности и экологической устойчивости энергосистем.

В ряде исследований задача минимизации потерь решается за счёт оптимального размещения устройств FACTS. В работе [10] для снижения потерь в установившемся режиме используются тиристорно-управляемые фазосдвигающие трансформаторы (TCPS) с применением метода модального анализа.

В работе [11] показано, что применение эволюционных и гибридных алгоритмов (включая ABC–DE, MFO, GWO) при размещении устройств TCSC, SVC и UPFC позволяет эффективно снижать потери активной мощности и отклонения напряжения. В [12] для минимизации потерь и затрат генерации используются различные метаэвристические алгоритмы (BMO, PSO, MPA, GSA, HBO, TLBO) с применением как шунтирующих (SVC), так и последовательных (TCSC, TCPS) устройств компенсации.

2.4 Повышение надежности и безопасности энергосистемы

Функционирование современных социально-экономических систем, включая критически важные объекты (например, системы здравоохранения) и цифровые сервисы, напрямую зависит от надёжности и безопасности электроснабжения. В этой связи обеспечение надёжности и устойчивости электроэнергетических систем является приоритетной задачей.

При проектировании и эксплуатации электрические сети формируются с учётом требований надёжности и критериев безопасности (в том числе по принципу N-1), обеспечивающих работоспособность системы при возникновении аварийных возмущений. Однако поддержание необходимых запасов устойчивости и надёжности в условиях ограниченных инвестиционных ресурсов представляет собой сложную задачу. Для повышения надёжности и управляемости режимов широко применяются устройства FACTS, при этом их эффективное использование требует оптимального выбора типа, параметров и мест установки на основе методов оптимизации.

В работе [13] рассматривается размещение TCSC с целью повышения статической и динамической устойчивости напряжения с использованием метода чувствительности. В работе [14] для повышения надёжности энергосистемы используется алгоритм гравитационного поиска (GSA) при размещении устройств TCSC, SVC и UPFC с учётом индексов безопасности, таких как отклонения напряжения и коэффициенты загрузки линий.

В работе [15] предложен подход на основе нелинейного программирования для разработки корректирующих воздействий, направленных на повышение динамической устойчивости энергосистемы при возникновении переходных процессов, при этом используются быстродействующие свойства устройств UPFC для реализации управляющих воздействий.

2.5 Повышение статической и динамической устойчивости

Сетевая инфраструктура, сформированная при ограниченных прогнозных возможностях, характеризуется ограниченной пропускной способностью и управляемостью. Рост электропотребления и интеграция новых источников генерации приводят к работе сетей вблизи предельных режимов, сопровождаясь увеличением потерь, отклонениями напряжения и снижением устойчивости. Применение устройств FACTS позволяет повысить управляемость, снизить потери и улучшить устойчивость, откладывая необходимость строительства новых линий электропередачи.

В работе [16] методы чувствительности и индексные методы применяются для оптимального размещения STATCOM с целью снижения потерь и повышения устойчивости напряжения.

В работе [17] предложен подход на основе смешанной целочисленной динамической оптимизации (MIDO) для обеспечения допустимых показателей переходной устойчивости и кратковременной устойчивости напряжения при тяжёлых возмущениях; задача решается методом ветвей и границ с применением SVC. В [18] задача предотвращения коллапса напряжения формализована как задача метода смешанного целочисленного

нелинейного программирования и решается с использованием генетического алгоритма (GA) и методов последовательного линейного программирования.

2.6 Повышение устойчивости частоты

Рост электропотребления и развитие возобновляемой генерации, характеризующейся высокой стохастичностью и низкой инерционностью, приводят к ухудшению частотной устойчивости электроэнергетических систем. Недостаточное демпфирование колебаний может вызывать нарушение режимов и, в предельных случаях, системные аварии. В этих условиях регулирование частоты и мощности становится ключевым элементом управления.

Для повышения эффективности регулирования частоты применяются современные методы управления, включая оптимальные, адаптивные, робастные и интеллектуальные алгоритмы. В ряде работ показана эффективность применения устройств FACTS для демпфирования колебаний и повышения устойчивости частоты. Так, в [19] анализ субсинхронного резонанса выполняется с применением метода собственных значений и анализа демпфирующих моментов с учётом FACTS-устройств на базе преобразователей напряжения (VSC).

2.7 Оптимизация распределения реактивной мощности

Разнесённость генерации и нагрузки требует передачи значительных мощностей на большие расстояния, что сопровождается потерями и отклонениями напряжения, обусловленными реактивными параметрами сети. Это ухудшает профиль напряжения и снижает устойчивость, создавая риск нарушения режимных ограничений и аварий. Обеспечение допустимых уровней напряжения достигается за счёт управления реактивной мощностью и применения компенсирующих устройств. При этом задача их оптимального размещения и настройки носит многопараметрический характер и требует использования эффективных методов оптимизации.

В работе [20] предложена стратегия планирования реактивной мощности на основе оценки запаса устойчивости по напряжению относительно точки коллапса в установившемся режиме. Для верификации подхода используются устройства SVC, а задача оптимизации решается методом внутренней точки; при этом выбор типа FACTS-устройства не получил достаточного обоснования.

2.8 Снижение выбросов парниковых газов

Рост энергопотребления при сохранении высокой доли генерации на ископаемом топливе сопровождается увеличением выбросов парниковых газов (CO_2, CH_4, N_2O) и негативным воздействием на окружающую среду. Повышение энергоэффективности и снижение выбросов являются ключевыми

задачами энергетики. В этом контексте устройства FACTS рассматриваются как эффективный инструмент снижения потерь, оптимизации режимов и повышения пропускной способности электроэнергетических систем.

В работе [2] представлен обзор применения силовой электроники, включая устройства DSTATCOM, для снижения выбросов парниковых газов. Рассмотрены различные методы оптимизации, особенности управления, а также преимущества и ограничения применения данных технологий в задачах повышения энергоэффективности и экологической устойчивости электроэнергетических систем.

Результаты и обсуждение

Анализ представленных в предыдущем разделе публикаций показывает, что применение устройств FACTS в целом способствует улучшению показателей функционирования электроэнергетических систем. При этом эффективность решения конкретных задач в значительной степени определяется типом применяемого устройства FACTS и выбранным методом оптимизации. В таблице 1 приведены классификации методов оптимизации в соответствии с решаемыми целевыми задачами, а также указаны типы используемых устройств FACTS и достигаемые эффекты. В таблицах 2-4 представлены сравнительное описание методов оптимизации с точки зрения их характеристик и ограничений.

Сравнительный анализ показывает, что классические аналитические методы отличаются высокой вычислительной эффективностью, однако ограничены при учёте нелинейности и задачах большой размерности. Методы математического программирования обеспечивают хорошую сходимость, но испытывают трудности при большом числе ограничений. Современные метаэвристические алгоритмы наиболее универсальны для многокритериальных задач, позволяя получать множество альтернативных решений и эффективно учитывать ограничения. Вместе с тем они не гарантируют нахождение глобального оптимума и чувствительны к начальным условиям.

Как следует из таблиц 2–4, различные методы оптимизации обладают разной областью применимости: одни более эффективны для задач малой размерности, другие – для крупномасштабных систем; одни обеспечивают более высокую скорость сходимости, другие – более высокую точность; одни предпочтительны для многокритериальной оптимизации, тогда как другие эффективнее при решении одноцелевых задач. В связи с этим выбор метода оптимизации должен осуществляться с учётом специфики постановки задачи.

Для повышения эффективности решений всё более широко применяются гибридные подходы, объединяющие преимущества различных методов.

Следует отметить, что при выборе метода оптимизации важное значение имеет не только достижение минимального значения целевой функции, но и практическая реализуемость полученного решения. Поэтому наиболее обоснованным является применение таких методов, которые позволяют одновременно анализировать несколько критериев и формировать набор компромиссных решений. Кроме того, результаты оптимизации должны быть устойчивыми к изменению исходных данных

Анализ литературы показывает, что большинство исследований ограничено 1–3 типами устройств FACTS, а сравнительный анализ методов оптимизации носит фрагментарный характер. Для объективной оценки необходимы комплексные исследования с учётом точности, скорости сходимости и устойчивости к локальным минимумам, что определяет перспективные направления дальнейших работ.

Таблица 1 – Классификация методов оптимизации по целям

№	Цель	Ссылка	Метод	FACTS	Класс метода	Эффект
1	Снижение перегрузок в сети	[3]	EV	SVC, TCSC	КАМ	1,2
		[4]	SM	TCSC, UPFC	КАМ	3,4
		[5]	NLP	TCSC	КАМП	3,2
		[1]	PSO	TCSC, SVC	СМА	4
2	Оптимизация затрат	[6]	SM	Продольные FACTS	КАМ	5
		[7]	NLP	TCSC, SVC	КАМП	6
		[8]	GA PSO	UPFC	СМА	7
		[9]	BBO PSO	TCSC, SVC UPFC	СМА	8,9
3	Снижение потерь мощности	[10]	MA	TCPS	КАМ	2,10
		[11]	GWO	UPFC, SVC	СМА	8,3
		[12]	MPA GSA TLBO	TCSC, TCPS GSA, TLBO	СМА	11
4	Оптимизация распределения реактивной мощности	[20]	IPM	SVC	КАМ	2,10

5	Повышение надежности и безопасности энергосистемы	[13]	SM	TCSC	КАМ	1
		[15]	NLP	UPFC	КАМП	12
		[14]	GSA	TCSC, SVC, UPFC	СМА	13,14
6	Повышение устойчивости частоты	[19]	EV	IPFC, GUPFC,SSC	КАМ	2
7	Повышение статической и динамической устойчивости	[16]	SM IM	STATCOM	КАМ	4,9
		[17]	BB	SVC	КАМП	15
		[18]	GA	SVC	СМА	16
8	Оптимизация распределения реактивной мощности	[2]	GA PSO	DSTATCOM	КАМ	4,10,3

Примечания к Таблице 1:
КАМ – Классические аналитические методы; КАМП – Классические методы математического программирования; СМА – Современные метаэвристические алгоритмы; 1 – повышение нагрузочной способности; 2 – повышение динамической устойчивости; 3 – минимизация затрат; 4 – снижение потерь мощности; 5 – улучшение диспетчеризации генерации; 6 – снижение отключений нагрузки; 7 – управление перегрузками; 8 – снижение отклонений напряжения; 9 – повышение безопасности системы; 10 – снижение гармоник; 11 – снижение затрат на генерацию; 12 – улучшение профиля напряжения; 13 – повышение устойчивости по напряжению; 14 – оптимальный режим; 15 – управление реактивной мощностью; 16 – превентивное управление аварийными режимами.

Таблица 2 – Сравнительный анализ существующих классических аналитических методов оптимизации

Метод оптимизации	**Преимущества**	**Ограничения**
Метод модального анализа	Способность прогнозировать ключевые характеристики альтернативных решений	Снижение точности из-за учета ограничений; ограниченная прогностическая способность
Индексный метод	Быстрый доступ к требуемым параметрам; достаточная эффективность	Низкая гибкость; трудности прогнозирования и расчета неиндексируемых параметров
Управляемый метод	Простой принцип работы; легкость реализации	Снижение точности

Метод собственных значений	Возможность разбиения сложной задачи на простые	Необходимость большого объема вычислений
Метод чувствительности	Высокая надежность; способность прогнозировать результаты	Зависимость от предыдущих решений

Таблица 3 – Сравнительный анализ существующих классических алгоритмов математического программирования

Метод оптимизации	**Преимущества**	**Ограничения**
Метод Ньютона	Быстрая сходимость; простота реализации	Требуется модификация для крупных задач
Метод внутренней точки	Эффективен для задач с ограничениями	Риск попадания в локальный оптимум
Метод ветвей и границ	Снижение количества узлов; низкая сложность	Сложность применения для больших сетей
Нелинейное программирование	Высокая эффективность; применимость к нелинейным задачам	Риск локального оптимума
MINLP	Работа с непрерывными и дискретными переменными	Нет гарантии глобального оптимума
ACL	Повышенная гибкость и устойчивость	Возможные нестабильности; сложность реализации
Динамическое программирование	Использование подзадач; поиск глобального решения	Отсутствие универсального алгоритма; высокая трудоемкость

Таблица 4 – Сравнительный анализ существующих современных метаэвристических алгоритмов

Метод оптимизации	**Преимущества**	**Ограничения**
Имитация отжига (SA)	Решение нелинейных задач; поиск глобального решения	Длительные вычисления; нет гарантии точности
Поиск с запретами (TS)	Интенсификация и диверсификация поиска	Требует большого числа итераций; много параметров
VNS	Повышение качества решений	Чрезмерная разведка; медленная сходимость

GLS	Выход из локальных минимумов	Нет критерия остановки
GSA	Хороший глобальный поиск	Слабый локальный поиск
Генетический алгоритм (GA)	Простота реализации; избегание локальных минимумов	Медленная сходимость; нет гарантии глобального оптимума
DE	Мало параметров; постепенное улучшение	Зависимость от параметров
CSA	Разнообразие решений; высокая адаптивность	Риск преждевременной сходимости
Меметический алгоритм	Предотвращение преждевременной сходимости	Низкое разнообразие решений
BSA	Исключение плохих решений	Неприменим без частичных решений
SOS	Не требует настройки параметров; быстрая сходимость	Сложность балансировки поиска
SOA	Хорошие глобальные поисковые способности	Риск локального оптимума
ACO	Адаптивность;	Медленная сходимость
PSO	Простота реализации; высокая скорость сходимости	Риск локального оптимума
ABC	Гибкость и устойчивость	Проблемы точности; преждевременная сходимость
CSO	Баланс разведки и функций	Риск локального оптимума
CRO	Адаптивная популяция; параллельные вычисления	Медленная сходимость
WCA	Подходит для крупных задач	Преждевременная сходимость
EPC	Решение нелинейных задач	Замедление сходимости
GWO	Альтернативные решения	Медленная сходимость
GSO	Разбиение на подзадачи	Снижение точности
IWD	Быстрая сходимость	Сложность остановки

JOA	Подходит для крупных задач	Низкая гибкость
ALO	Баланс поиска	Преждевременная сходимость

Выводы

Согласно прогнозам ведущих международных организаций, таких как Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) и International Energy Agency (IEA), ожидается дальнейший рост спроса на электроэнергию. Непрерывное развитие науки и технологий обусловливает внедрение новых типов оборудования и нагрузок, что приводит к усложнению структуры электроэнергетических систем и увеличению их размерности. В этих условиях применение устройств FACTS и оптимизация режимов работы энергосистем становятся необходимыми для обеспечения надёжности и эффективности функционирования.

Среди современных решений особое внимание уделяется многофункциональным устройствам, таким как UPFC и GUPFC, обладающим возможностью комплексного регулирования параметров режима (напряжения, потоков мощности, реактивной мощности). Вместе с тем существенным ограничивающим фактором их широкого внедрения остаётся высокая стоимость. Как показано в [11], несмотря на более высокую эффективность UPFC в снижении загрузки линий и отклонений напряжения, его применение сдерживается значительными капитальными затратами, превышающими суммарную стоимость альтернативных решений на базе TCSC и SVC. В связи с этим перспективным направлением исследований является разработка методов оптимизации стоимости внедрения устройств FACTS с учётом их технико-экономической эффективности.

Анализ современных тенденций показывает активное развитие многокритериальных методов оптимизации, включая Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA), Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) и NSGA. Следует отметить, что эффективность метаэвристических алгоритмов существенно зависит от характера решаемой задачи, что требует проведения сравнительного анализа различных подходов для выбора наиболее подходящего метода. В этой связи особый интерес представляют гибридные методы, сочетающие классические подходы с алгоритмами многокритериальной оптимизации на основе недоминируемой сортировки, которые демонстрируют высокую эффективность при решении сложных задач с множеством ограничений и целей.

Стремительный рост электропотребления, необходимость повышения экономической эффективности и значительные капитальные затраты на развитие сетевой инфраструктуры приводят к обострению таких проблем, как перегрузка линий электропередачи, снижение энергоэффективности, ухудшение устойчивости (в том числе напряжения и переходной устойчивости), а также снижение качества и надёжности электроснабжения. Устройства FACTS доказали свою эффективность в повышении показателей функционирования электроэнергетических систем по различным направлениям.

В рамках настоящей работы выполнен обзор современных методов оптимизации, применяемых для решения задачи оптимального размещения устройств FACTS. Проведена их классификация в зависимости от целевых функций оптимизации. Кроме того, выполнен сравнительный анализ методов с выделением их преимуществ и ограничений, что позволяет обосновать выбор подходов для решения конкретных задач оптимизации в электроэнергетических системах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **John, A.J., Joseph, T., Sreedharan, S.** Allocation of FACTS Devices For Congestion Relief Using Particle Swarm Optimization // International Journal of Engineering Research and Technology. – 2013. – Vol. 2. – P. 2395–2401.

2 **Hannan, M.A., Hossain Lipu, M.S., Ker, P.J., Begum, R.A., Agelidis, V.G., Blaabjerg, F.** Power electronics contribution to renewable energy conversion addressing emission reduction: Applications, issues, and recommendations // Applied Energy. – 2019. – Vol. 251. – P. 1–25.

3 **Pilotto, L.A.S., Ping, W.W., Carvalho, A.R., Wey, A., Long, W.F., Alvarado, F.L., Edris, A.** Determination of needed FACTS controllers that increase asset utilization of power systems // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1997. – Vol. 12. – P. 364–371.

4 **Orfanogianni, T., Bacher, R.** Steady-state optimization in power systems with series FACTS devices // IEEE Transactions on Power Systems. – 2003. – Vol. 18. – P. 19–26.

5 **Esmaili, M., Shayanfar, H.A., Moslemi, R.** Locating series FACTS devices for multi-objective congestion management improving voltage and transient stability // European Journal of Operational Research. – 2014. – Vol. 236. – P. 763–773.

6 **Sahraei-Ardakani, M., Blumsack, S. A.** Transfer Capability Improvement Through Market-Based Operation of Series FACTS Devices // IEEE Transactions on Power Systems. – 2016. – Vol. 31. – P. 3702–3714.

7 **Ghaemi, S., Aghdam, H., Safari, A., Farrokhifar, M.** Stochastic economic analysis of FACTS devices on contingent transmission networks using hybrid biogeography-based optimization // Springer Nature. – 2019. – Vol. 101. – P. 829–843.

8 **Taher, S. A., Amooshahi, M. K.** New approach for optimal UPFC placement using hybrid immune algorithm in electric power systems // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2012. – Vol. 43. – P. 899–909.

9 **Kavitha, K., Neela, R.** Optimal allocation of multi-type FACTS devices and its effect in enhancing system security using BBO, WIPSO & PSO. // Journal of Electrical Systems and Information Technology. – 2018. – Vol. 5. – P. 777–793.

10 **Xing, K., Kusic, G.** Application of thyristor-controlled phase shifters to minimize real power losses and augment stability of power systems // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1988. – Vol. 3. – P. 792–798.

11 **Shehata, A. A., Korovkin, N. V., Tolba, M. A., Tulsky, V. N.** Efficient Utilization of the Power Grid using FACTS devices based on a new Metaheuristic Optimizer // Proceedings of the 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – Moscow, Russia, 11–13 March 2021. – P. 1–7.

12 **Sulaiman, M. H., Mustaffa, Z.** Optimal placement and sizing of FACTS devices for optimal power flow using metaheuristic optimizers // Results in Control and Optimization. – 2022. – Vol. 8. – Art. 100145.

13 **Verma, M. K., Srivastava, S. C.** Optimal Placement of TCSC for Static and Dynamic Voltage Security Enhancement. – Madras : Indian Institute of Technology, 2004. – P. 713–718..

14 **Padmavathi, V. S., Sahu, S. K., Jayalaxmi, A.** Application of gravitational search algorithm to improve power system security by optimal placement of FACTS devices // Journal of Electrical Systems. – 2015. – Vol. 11. – P. 326–342.

15 **Bruno, S., De Tuglie, E., La Scala, M., Scarpellini, P.** Dynamic security corrective control by UPFCs // IEEE Transactions on Power Systems. – 2001. – Vol. 16. – P. 490–497.

16 **Ismail, B., Wahab, N. I. A., Ahmad, W., Othman, M. L., Radzi, M. A. M., Vijayakumar, K. N., Naain, M. M.** Analytical approaches on optimal placement of STATCOM under contingency occasions // Proceedings of the 2nd International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES). – Bangkok, Thailand, 15–18 September 2020. – P. 7–12.

17 **Tiwari, A., Ajjarapu, V.** Optimal Allocation of Dynamic VAR Support Using Mixed Integer Dynamic Optimization // IEEE Transactions on Power Systems. – 2011. – Vol. 26. – P. 305–314.

18 **El-Araby, E. E., Yorino, N., Sasaki, H.** A Comprehensive Approach for FACTS Devices Optimal Allocation to Mitigate Voltage Collapse. 2002.

19 **Venkateswarlu, S., Janaki, M., Thirumalaivasan, R., Prabhu, N.** A review on damping of torsional interactions using VSC based FACTS and subsynchronous damping controller // Annual Reviews in Control. – 2018. – Vol. 46. – P. 251–264.

20 **Parker, C. J., Morrison, I. F., Sutanto, D.** Application of an optimisation method for determining the reactive margin from voltage collapse in reactive power planning // IEEE Transactions on Power Systems. – 1996. – Vol. 11. – P. 1473–1481.

Поступило в редакцию 29.04.26.
Поступило с исправлениями 05.05.26.
Принято в печать 31.08.26.

**Т. М. Абылкаиров[1], А. Т. Бектимиров[2]*
[1,2]Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы
энергетика және байланыс университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[2]R&D Power Grid Automation,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
29.04.26 ж. баспаға түсті.
05.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

FACTS ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕР РЕЖИМДЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ ӘДІСТЕРІНЕ ШОЛУ

Соңғы онжылдықтарда электр энергиясына сұраныстың қарқынды өсуі электр желілерінің өткізу қабілетінің шекті мәндеріне жақын режимдерде жұмыс істеуіне алып келді. Бұл өз кезегінде қуат шығындарының артуымен, тұрақтылық қорларының төмендеуімен, сондай-ақ электрмен жабдықтаудың сапасы мен сенімділігінің нашарлауымен қатар жүреді. FACTS құрылғылары электр энергетикалық жүйелердің басқарылуын және пайдалану тиімділігін арттырудың ең тиімді құралдарының бірі ретінде қарастырылады.

FACTS құрылғыларын қолдануға арналған зерттеулер көлемінің айтарлықтай болуына қарамастан, қолданыстағы әдебиеттер фрагменттелген сипатқа ие: әртүрлі жұмыстарда салыстыруға келмейтін мақсаттық функциялар, әркелкі есеп қойылымдары және тиімділікті бағалаудың әртүрлі критерийлері қолданылады. Бұл нәтижелерді жүйелі салыстыруды және бірізді қорытындылар қалыптастыруды қиындатады. Сонымен қатар, оңтайландыру есептерін олардың электр энергетикалық жүйелердің жұмыс режимдеріне әсері тұрғысынан жіктеудің бірыңғай тәсілі жоқ.

Осы мақалада FACTS құрылғыларын қолдану арқылы электр энергетикалық жүйелердің тиімділігін арттыру әдістеріне жүйелендірілген және сыни шолу ұсынылады. Қолданыстағы зерттеулерден айырмашылығы, оңтайландырудың мақсаттық функцияларына негізделген тәсілдердің құрылымдалған жіктемесіне ерекше назар аударылады. Әртүрлі оңтайландыру әдістерінің артықшылықтары мен кемшіліктерін, сондай-ақ олардың әртүрлі өлшемдегі және күрделіліктегі есептерге қолданылуын анықтауға бағытталған терең салыстырмалы талдау жүргізілді.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы FACTS құрылғыларын орналастыру есептері үшін мақсаттық функцияларды жіктеудің бірыңғай құрылымын қалыптастыруда, қолданыстағы тәсілдердің негізгі әдіснамалық шектеулерін анықтауда және болашақ зерттеулердің перспективалы бағыттарын айқындауда көрініс табады.

Кілтті сөздер: FACTS құрылғылары, оңтайландыру әдістері, оңтайландырудың мақсаттық функциялары, метаэвристикалық алгоритмдер, электр энергетикалық жүйелер.

**T. M. Abylkairov[1], A. T. Bektimirov[2]*
[1,2] Gumarbek Daukeyev Almaty University of Power
Engineering and Telecommunications,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2]R&D Power Grid Automation,
Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 29.04.26.
Received in revised form 05.05.26.
Accepted for publication 31.08.26.

REVIEW OF OPTIMIZATION METHODS FOR POWER SYSTEM OPERATION USING FACTS DEVICES

In recent decades, the rapid growth in electricity demand has led to the operation of power networks under conditions close to their maximum transmission capacity limits. This is accompanied by increased power losses, reduced stability margins, and deterioration in the quality and reliability of power supply. FACTS devices are considered one of the most effective tools for improving controllability and operational efficiency of power systems.

Despite the significant volume of research devoted to the application of FACTS devices, the existing literature remains fragmented: different studies employ incomparable objective functions, heterogeneous problem formulations, and varying performance evaluation criteria. This makes it difficult to systematically compare results and develop unified conclusions. In addition, there is no unified approach to the classification of optimization problems in terms of their impact on power system operating conditions.

This paper presents a systematic and critical review of methods for improving the performance of power systems using FACTS devices. In contrast to existing studies, particular attention is paid to a structured classification of approaches based on optimization objective functions. A comprehensive comparative analysis is conducted to identify the strengths and limitations of various optimization methods, as well as their applicability to problems of different scales and complexity.

The scientific contribution of this work lies in the development of a unified framework for classifying optimization objective functions in FACTS placement problems, the identification of key methodological limitations in existing approaches, and the determination of promising directions for future research.

Keywords: FACTS devices, optimization methods, objective functions, metaheuristic algorithms, power systems.

МРНТИ 44.31.35

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/27-41

***Г. А. Айтмагамбетова[1], А. С. Никифоров[2]**

[1,2]Торайгыров университет,
Республика Казахстан, г. Павлодар.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7934-9990
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6977-0957
*e-mail: gul_2904@mail.ru

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОПОТЕРЬ ПЕЧИ ПРОКАЛКИ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМПЛЕКСА ПРОИЗВОДСТВА ПРОКАЛЕННОГО КОКСА

В статье выполнен системный анализ влияния теплопотерь печи прокалки на энергетическую эффективность комплекса производства прокаленного нефтяного кокса. Исследование основано на сочетании ориентированного графового представления технологической схемы, укрупненного материального и теплового баланса, а также аналитического расчета теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку вращающейся печи.

Показано, что теплопотери через ограждающие конструкции печи оказывают не только локальное, но и системное влияние на распределение тепловых потоков в последующих узлах комплекса. Для количественной оценки тепловых потерь выполнен аналитический расчет теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку с учетом конвективного и лучистого теплообмена с окружающей средой. На основе параметрического анализа установлено, что перераспределение толщин футеровки и теплоизоляционного слоя при неизменной суммарной толщине 0,392 м приводит к изменению теплопотерь в диапазоне 0,705–1,297 МВт.

С использованием ориентированного графа обосновано, что снижение теплопотерь печи повышает температуру отходящих газов, увеличивает тепловую нагрузку котла-утилизатора и способствует росту выработки пара и электрической энергии. Полученные результаты подтверждают системный характер влияния теплового состояния печи прокалки на энергоэффективность всего комплекса и определяют направления его оптимизации.

Ключевые слова: прокаленный кокс, печь прокалки, тепловые потери, энергоэффективность, тепловой баланс, ориентированный граф.

Введение

Производство прокаленного нефтяного кокса относится к числу наиболее энергоемких процессов углеродной и металлургической промышленности. Высокие температуры прокалки, длительное время пребывания материала в печи и значительные объемы теплообмена обуславливают повышенные удельные энергетические затраты. В структуре энергопотребления комплекса основная нагрузка приходится на печь прокалки, которая в значительной степени определяет тепловой режим всей технологической схемы.

Вопросы повышения энергетической эффективности высокотемпературных теплотехнологических агрегатов, в том числе вращающихся печей, широко рассматриваются в современной научной литературе. Особое внимание уделяется анализу теплопотерь, механизмам теплообмена и возможностям снижения удельных энергозатрат в энергоемких промышленных процессах.

Значительная доля энергетических потерь во вращающихся печах связана с теплопередачей через ограждающие конструкции и неэффективным использованием подводимой теплоты [1, с. 2042]. Авторы подчеркивают, что мероприятия по снижению теплопотерь печей оказывают прямое влияние на суммарную энергоэффективность промышленных комплексов и могут обеспечивать существенную экономию топлива.

В работе [2, с. 1011] предложены комплексные тепло-технологические модели вращающихся печей, учитывающие взаимосвязь тепловых и гранулярных процессов. Показано, что корректное описание теплообмена между газовой фазой, твердым материалом и стенкой печи позволяет более точно оценивать распределение тепловых потоков и выявлять зоны повышенных теплопотерь, связанные с конструктивными особенностями аппарата.

Значительный вклад в исследование энергоэффективности вращающихся печей внесли [3, с. 430], предложив метод определения тепловых характеристик печи на основе температуры наружной поверхности корпуса. В этих исследованиях показано, что для определения температуры наружной поверхности целесообразно сочетать экспериментальные данные с аналитическими и численными моделями теплопередачи. Сочетание аналитических уравнений теплопроводности и численного моделирования

позволяет определить коэффициенты теплообмена и количественно оценить теплопотери через стенку печи.

В работе [4, с. 131] выполнен детальный анализ конвективного теплообмена в барабанных аппаратах, показавший существенное влияние режимов движения газа и материала на тепловой баланс печи. Аналогичные выводы получены в исследованиях, посвященных численному моделированию тепловых и массообменных процессов во вращающихся барабанах [5, с. 1].

Влияние лучистого теплообмена и его вклад в общий тепловой поток во вращающихся печах рассмотрены в работе [6, с. 100], где показано, что при высоких температурах доля лучистого теплообмена становится сопоставимой с конвективной составляющей. Кроме того, авторы [7, с. 517] исследовали возможности утилизации тепла через наружную поверхность корпуса вращающихся печей, подтвердив значительный потенциал снижения теплопотерь за счет конструктивных и режимных мероприятий.

Несмотря на значительное количество исследований, большинство работ рассматривает вращающую печь как отдельный аппарат без учета ее взаимодействия с последующими узлами утилизации тепла. Поэтому актуальным является комплексный подход, позволяющий оценить влияние теплопотерь печи на энергетические показатели всего технологического комплекса.

Научная новизна исследования заключается в комплексной оценке влияния теплопотерь печи прокалки на энергетическую эффективность комплекса производства прокаленного кокса. В отличие от локального рассмотрения тепловых потерь печи, в работе оценено их влияние на последующие технологические узлы, включая котел-утилизатор и паротурбинную установку.

Для анализа взаимосвязи между технологическими узлами использовано представление комплекса в виде ориентированного графа. На его основе выполнены укрупненные материальный и тепловой балансы, а теплопотери печи определены аналитическим расчетом теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку. Результаты аналитического расчета проверены с помощью численного моделирования в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

Дополнительно проведен параметрический анализ влияния соотношения толщин футеровки и теплоизоляции при постоянной суммарной толщине стенки 0,392 м. Установлено, что увеличение толщины теплоизоляции приводит к снижению теплопотерь, однако сопровождается уменьшением толщины футеровки, что необходимо учитывать при выборе конструкции стенки печи.

Материалы и методы

Методологическая основа

Методологическая основа исследования включает три взаимосвязанных этапа [3, с. 432]: структурный анализ комплекса с использованием ориентированного графа, укрупненный материальный и тепловой баланс узлов и расчет теплопередачи через стенку печи прокалки. Ориентированный граф позволяет проследить направление движения материальных и энергетических потоков и оценить влияние печи прокалки на последующие узлы утилизации тепла. Укрупненные балансы позволяют количественно оценить основные потоки энергии и тепловые потери. Расчет теплопередачи через ограждающие конструкции используется для определения теплопотерь печи.

Структурное представление комплекса

В упрощенном виде структура комплекса прокалки нефтяного кокса может быть представлена в виде последовательности взаимосвязанных технологических узлов: печь прокалки, печь дожига летучих веществ, котел-утилизатор, паротурбинная установка и конденсационно-деаэрационный контур с обратными тепловыми связями от холодильника прокаленного кокса [8, с. 6].

Такое представление позволяет одновременно учитывать прямые и возвратные материальные и тепловые потоки, формирующие замкнутую теплотехнологическую систему (рисунок 1).

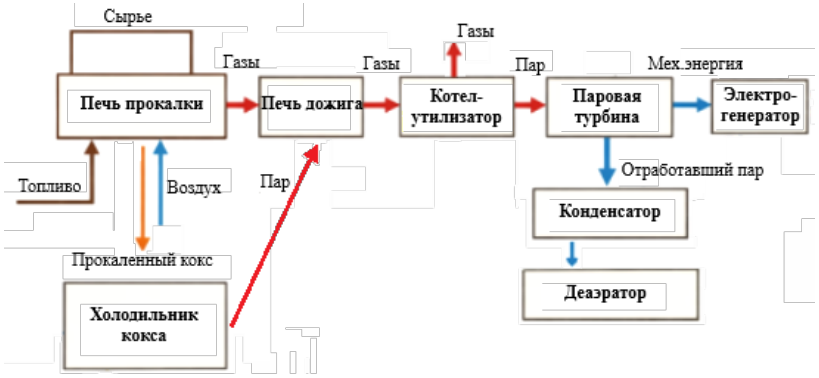


Рисунок 1 – Схема ориентированного графа материальных и тепловых потоков комплекса производства прокаленного кокса

Использование ориентированного графа позволяет перейти от качественного описания технологической схемы к количественному

анализу тепловых потоков и теплопотерь отдельных узлов, в том числе печи прокалки.

Печь прокалки является центральным теплотехнологическим узлом комплекса производства прокаленного нефтяного кокса и в значительной степени определяет характер формирования основных материальных и тепловых потоков всей системы. В печи осуществляется высокотемпературная обработка сырого кокса, сопровождающаяся удалением влаги и летучих веществ, структурной перестройкой материала и накоплением внутренней энергии в прокаленном продукте.

Материальный баланс печи прокалки основан на законе сохранения массы и включает учет потоков сырого кокса, топлива, воздуха для горения, прокаленного кокса и отходящих газов. Согласно расчетным данным, масса прокаленного кокса составляет в среднем 86-89 % от массы исходного сырья, а остальная часть удаляется в виде летучих компонентов и газообразных продуктов сгорания.

Тепловой баланс печи прокалки формируется за счет теплоты сгорания топлива, частичного окисления летучих веществ кокса и теплового содержания входящих потоков. Основные статьи расхода теплоты связаны с нагревом и термической обработкой кокса, нагревом отходящих газов, а также с теплопотерями через футеровку и конструктивные элементы печи. Расчет показывает, что теплопотери через ограждающие поверхности (6-10 %) составляют заметную часть подводимой тепловой мощности и оказывают влияние на энергетические показатели печи и всего комплекса.

Результаты и обсуждение

Аналитический расчет теплопотерь через стенку печи прокалки

Для количественной оценки теплопотерь через ограждающие конструкции печи прокалки выполнен аналитический расчет теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку вращающейся печи в стационарном режиме. Печь прокалки состоит из металлического корпуса, футерованного внутри огнеупорным и теплоизоляционным материалом. Методика расчета основана на подходе, применяемом при анализе тепловых процессов во вращающихся печах [3, с. 431], где теплопередача описывается через совокупность процессов теплопроводности, конвекции и излучения.

Ранее разработанная модель комплекса в виде ориентированного графа позволила перейти от локального анализа печи прокалки к системной оценке её влияния на энергетические показатели всего производства. В рамках графовой структуры каждая вершина соответствует отдельному узлу технологической схемы, а рёбра отражают направленные материальные и тепловые потоки между ними.

Такое представление обеспечивает возможность проследить распространение изменения энергетического состояния печи прокалки по всей цепочке преобразований энергии: от формирования газового потока после прокалки до работы печи дожига, котла-утилизатора и паротурбинного контура.

Расчет ориентированного графа показал, что увеличение тепловых потерь через ограждающие конструкции печи приводит к снижению энергетического потенциала отходящих газов, уменьшению доступной теплоты в котле-утилизаторе и, как следствие, к снижению паропроизводительности и электрической мощности комплекса.

Таким образом, снижение теплопотерь печи позволяет сохранить больше теплоты в отходящих газах и повысить эффективность ее последующей утилизации в котле-утилизаторе и паротурбинной установке.

Исходные данные, расчетная схема и основные допущения

Исходные данные для аналитического и численного моделирования сформированы на основе геометрических и теплотехнических характеристик рассматриваемой печи прокалки, а также принятых расчетных параметров теплообмена. Геометрические размеры печи, толщина конструктивных слоев и их коэффициенты теплопроводности использованы как исходные параметры расчетной модели. Геометрические характеристики печи получены по технической документации промышленного агрегата. Температурные условия и коэффициенты теплоотдачи приняты в соответствии с расчетной постановкой задачи. Для обеспечения сопоставимости результатов аналитического и численного расчетов одинаковые геометрические и теплофизические параметры использованы в обеих моделях.

В расчете приняты следующие допущения [9, с. 15]:

– процесс теплопередачи является стационарным;
– температурное поле вдоль длины печи усредняется;
– теплообмен внутри печи описывается эквивалентным коэффициентом теплоотдачи hin;
– теплообмен с окружающей средой учитывает конвекцию и лучистый теплообмен.
– температура газовой среды в зоне прокалки принята Tg = 1400 °C, температура окружающей среды = 20 °C.
– длина печи составляет L = 65 м.
– внутренний коэффициент теплоотдачи принят hin = 30 Вт/м²К,
– наружный коэффициент конвективной теплоотдачи hout = 10 Вт/м²К.
– коэффициент излучения поверхности корпуса принят ε = 0,8.

Геометрические и теплофизические параметры слоев стенки:

– внутренний диаметр печи – 2930 мм;
– наружная граница огнеупорной футеровки – 3470 мм;
– наружный диаметр теплоизоляционного слоя – 3714 мм;
– наружный диаметр печи – 3930 мм.
– толщина футеровки δ_{ref} = 0,27 м, λ_{ref} = 1,5 Вт/мК;
– толщина теплоизоляции δ_{ins} = 0,122 м, λ_{ins} = 0,25 Вт/мК;
– толщина металлического корпуса δ_{st} = 0,108 м, λ_{st} = 45 Вт/мК.

Принятые допущения определяют область применимости разработанной модели. Расчет предназначен для оценки стационарных тепловых потерь через ограждающие конструкции вращающейся печи при заданной средней температуре рабочей зоны и постоянных теплофизических свойствах материалов. Модель не учитывает продольное распределение температуры по длине печи, локальные температурные неоднородности, изменение теплофизических свойств материалов с температурой, влияние вращения на локальный теплообмен и нестационарные режимы работы. Поэтому полученные результаты применимы прежде всего для сравнительного параметрического анализа вариантов конструкции стенки и оценки влияния перераспределения толщин футеровки и теплоизоляции на суммарные теплопотери.

Основные параметры расчетной модели выбраны так, чтобы они соответствовали реальным условиям работы печи прокалки. Температура газовой среды определяет количество теплоты, которое передается внутренней поверхности печи. Коэффициент внутренней теплоотдачи показывает интенсивность передачи теплоты от горячих газов к футеровке. Наружный коэффициент теплоотдачи и степень черноты поверхности учитывают теплообмен с окружающей средой. Геометрические размеры футеровки, теплоизоляции и металлического корпуса приняты в соответствии с конструкцией исследуемой печи.

Теплопроводность многослойной цилиндрической стенки

Суммарное термическое сопротивление теплопроводности многослойной стенки определяется выражением:

$$R_{cond} = \sum_i \frac{ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)}{2\cdot\pi\cdot L\cdot\lambda_i} \quad (1)$$

где r_i и r_{i+1} – внутренний и внешний радиусы соответствующего слоя, λ_i– коэффициент теплопроводности материала слоя.

Теплообмен на границах стенки

Сопротивление внутреннего теплообмена между газовой средой и футеровкой определяется как:

$$R_{in} = \frac{1}{h_{in} \cdot A_{in}}, \; A_{in} = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot r_1 \qquad (2)$$

Теплоотдача с наружной поверхности корпуса учитывает конвективный и лучистый теплообмен. Эквивалентный коэффициент лучистого теплообмена определяется по выражению:

$$h_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_в^2 + T_\infty^2) \cdot (T_в + T_\infty) \qquad (3)$$

где $T_В$ – температура наружной поверхности корпуса,
σ – $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м^{2}К^4.

Сопротивление наружного теплообмена:

$$R_{out} = \frac{1}{(h_{out} + h_{rad}) \cdot A_{out}}, \; A_{out} = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot r_4 \qquad (4)$$

Определение теплопотерь

Тепловой поток теплопотерь через стенку печи определяется из уравнения стационарного теплового баланса:

$$Q_{loss} = \frac{T_g + T_\infty}{R_{in} + R_{cond} + R_{out}} \qquad (5)$$

Температура наружной поверхности корпуса определяется итерационным способом из условия равенства теплового потока, проходящего через стенку и теплового потока, отводимого в окружающую среду [10, с. 42].

Результаты расчета

С целью анализа влияния перераспределения толщин между футеровкой и теплоизоляцией расчёты выполнены при условии постоянства суммарной толщины 0,392 м. При этом изменение толщины теплоизоляционного слоя осуществлялось за счёт соответствующего уменьшения толщины футеровки и наоборот. Толщина металлического корпуса оставалась неизменной.

Теплопередача через стенку печи рассматривалась в стационарной постановке и включала:

– теплопроводность через многослойную цилиндрическую стенку;
– конвективный теплообмен между рабочей зоной печи и футеровкой;

– конвективный и лучистый теплообмен между наружной поверхностью корпуса и окружающей средой.

Результаты расчёта температуры наружной поверхности корпуса и суммарных теплопотерь печи прокалки при различном соотношении толщин футеровки и теплоизоляции приведены в таблице 1.

Численное решение теплопередачи в печи прокалки

Для проверки результатов аналитического расчета выполнено численное моделирование в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Расчет проведен в стационарной постановке с использованием физического интерфейса Heat Transfer in Solids. В численной модели сохранены те же геометрические размеры, толщины слоев и свойства материалов, что и в аналитическом расчете. Результаты сравнивались по температуре наружной поверхности корпуса и общим теплопотерям печи.

На рисунке 2 представлены граничные условия теплообмена, принятые в модели.

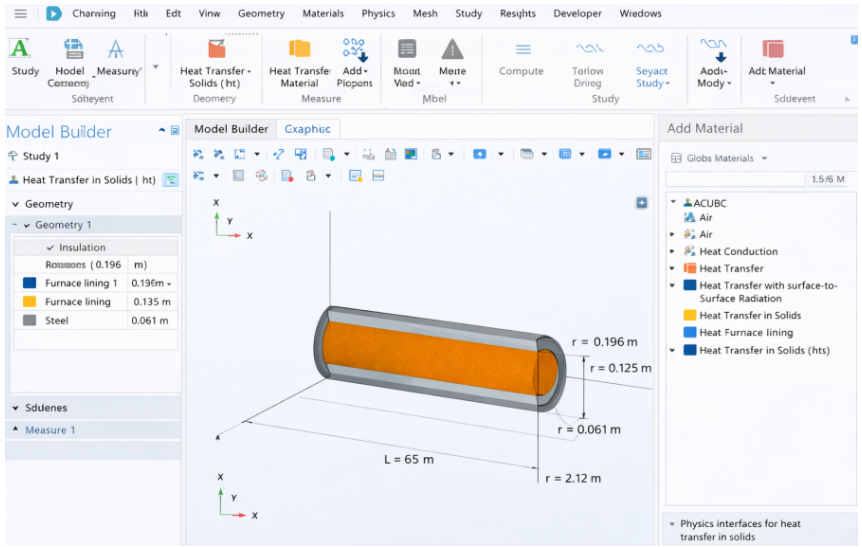


Рисунок 2 – Задание граничных условий теплообмена в модели печи прокалки

Геометрическая модель печи представлена в виде осесимметричного цилиндра, включающего слои футеровки, теплоизоляции и металлического корпуса. Геометрические размеры и теплофизические свойства

материалов соответствуют значениям, принятым в аналитическом расчете. Внутренняя поверхность футеровки задана при постоянной температуре, соответствующей температуре газовой среды в зоне прокалки, а на наружной поверхности корпуса учтен теплообмен с окружающей средой за счет конвекции и излучения.

Сопоставление аналитических и численных результатов

Для оценки влияния перераспределения толщин ограждающих слоев на уровень теплопотерь печь прокалки рассмотрена как многослойная цилиндрическая стенка, включающая футеровку, теплоизоляцию и металлический корпус. При этом изменение толщины одного слоя компенсируется соответствующим изменением толщины другого. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение аналитических и численных оценок теплопотерь печи прокалки

Толщина теплоизоляции, м	**Толщина футеровки, м**	**Температура по формулам, °C**	**Теплопотери МВт (анал.)**	**Температура корпуса (COMSOL)**	**Теплопотери МВт (COMSOL)**	**Погрешность теплопотерь МВт**
0,122	0,27	102,6	1,297	113,0	1,286	0,011
0,15	0,242	96,0	1,151	104,1	1,144	0,007
0,2	0,192	86,0	0,955	91,7	0,951	0,004
0,25	0,142	78,1	0,813	82,2	0,81	0,003
0,3	0,092	71,7	0,705	74,7	0,703	0,002

Анализ данных таблицы 1 показывает выраженную зависимость теплопотерь печи от соотношения толщин футеровки и теплоизоляции при неизменной суммарной толщине ограждающей конструкции. При увеличении толщины теплоизоляции с 0,122 до 0,3 м теплопотери печи последовательно снижаются. Одновременно уменьшается температура наружной поверхности корпуса. Наибольшее снижение теплопотерь получено для варианта с толщиной теплоизоляции 0,3 м.

Вместе с тем полученная зависимость не означает, что максимальная рассмотренная толщина теплоизоляции является оптимальной для промышленной эксплуатации. При увеличении толщины теплоизоляции до 0,3 м толщина огнеупорной футеровки уменьшается до 0,092 м, что может ограничивать возможность практической реализации такого варианта с учетом требований к механической прочности, термостойкости

и долговечности футеровки. Поэтому результаты таблицы 1 следует рассматривать как оценку теплотехнического потенциала перераспределения слоев, а не как непосредственную рекомендацию по изменению конструкции печи. Практический выбор толщины теплоизоляции должен выполняться с учетом минимально допустимой толщины футеровки, условий эксплуатации и экономической целесообразности.

В целом результаты подтверждают, что перераспределение толщин слоев при неизменной общей толщине стенки оказывает существенное влияние на энергетические показатели печи и может рассматриваться как одно из направлений повышения энергоэффективности комплекса производства прокаленного кокса.

Выводы

Выполненный аналитический и численный анализ показал, что перераспределение толщин футеровки и теплоизоляции при постоянной суммарной толщине ограждающей конструкции 0,392 м оказывает существенное влияние на теплопотери печи прокалки. При изменении толщины теплоизоляции от 0,122 до 0,3 м расчетные теплопотери снижаются с 1,297 до 0,705 МВт, то есть примерно на 45,6 %.

Численное моделирование в COMSOL Multiphysics подтвердило результаты аналитического расчета. Абсолютная разница между аналитическими и численными значениями теплопотерь составила 0,002–0,011 МВт, что соответствует менее 1 % от расчетного теплового потока.

Увеличение толщины теплоизоляции сопровождается снижением температуры наружной поверхности корпуса, что подтверждается как аналитическим расчетом, так и численным моделированием.

Практический выбор конструкции стенки должен выполняться с учетом минимально допустимой толщины футеровки, условий эксплуатации и экономической целесообразности.

Снижение теплопотерь печи повышает энергетический потенциал отходящих газов и создает условия для более эффективной утилизации теплоты в последующих узлах комплекса. Дальнейшее повышение энергоэффективности целесообразно рассматривать с учетом не только конструкции стенки печи, но и организации тепловых потоков в системе утилизации отходящих газов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Madlool, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., Rahim, N. A.** A critical review on energy use and saving in the cement industries [Текст] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – Vol. 15. – P. 2042–2060. – https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005

2 **Piton, M., Huchet, F., Le Corre, O., et al.** A coupled thermal–granular model in flights rotary kiln : Industrial validation and process design [Текст] // Applied Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 75. – P. 1011–1021.

3 **Huchet, F., Le Guen, L.** Energy efficiency of flights rotary kiln [Текст] // Proceedings of the 14th Quantitative InfraRed Thermography Conference (QIRT 2018). – Berlin, Germany, 2018. – P. 430 – 435. [Электронный ресурс]. – https://www.qirt2018.de/portals/qirt18/doc/Tu.4.A.1.pdf

4 **Le Guen, L., Huchet, F., Dumoulin, J.** Convective heat transfer analysis in aggregates rotary drum reactor [Текст] // Applied Thermal Engineering. – 2013. – Vol. 54. – P. 131–139. [Электронный ресурс]. – https://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.01.025

5 **Zhang, K., Muhunthan, B.** Numerical investigation of dry and wet mixing processes of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement [Текст] // Road Materials and Pavement Design. – 2018. – P. 1–15.

6 **Le Guen, L., Piton, M., Hénault, Q., et al.** Heat convection and radiation in flighted rotary kiln: A minimal model [Текст] // Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2017. – Vol. 95. – P. 100–110. – https://doi.org/10.1002/cjce.22659

7 **Huchet, F., Piton, M., Del Barrio, A., et al.** Air-cooling heat exchanger applied to external rotary kiln wall in forced and natural draft [Текст] // Energy Conversion and Management. – 2017. – Vol. 154. – P. 517–525. [Электронный ресурс]. – https://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.031

8 **Айтмагамбетова, Г.А., Никифоров, А.С.** Некоторые аспекты оптимизационной задачи энергоэффективной работы комплекса по прокалке кокса [Текст] // Вестник Торайгыров университета, № 3 – 2024. – С. 200.

9 **Седнин, В. А.** Моделирование, оптимизация и управление теплотехническими системами: учебное пособие [Текст] // Минск, БНТУ – 2021. – с. 68

10 **Громова, Е.Н.** Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки: учебное пособие [Текст] // ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2020. Часть 1. – с.88

REFERENCES

1 **Madlool, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., Rahim, N. A.** A critical review on energy use and saving in the cement industries [Text] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – Vol. 15. – P. 2042–2060. – https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005

2 **Piton, M., Huchet, F., Le Corre, O., et al.** A coupled thermal–granular model in flights rotary kiln: Industrial validation and process design [Text] // Applied Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 75. – P. 1011–1021.

3 **Huchet, F., Le Guen, L.** Energy efficiency of flights rotary kiln [Text] // Proceedings of the 14th Quantitative InfraRed Thermography Conference (QIRT 2018). – Berlin, Germany, 2018. – P. 430 – 435. [Electronic resourse]. – https://www.qirt2018.de/portals/qirt18/doc/Tu.4.A.1.pdf

4 **Le Guen, L., Huchet, F., Dumoulin, J.** Convective heat transfer analysis in aggregates rotary drum reactor [Text] // Applied Thermal Engineering. – 2013. – Vol. 54. – P. 131–139. [Electronic resourse]. – https://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.01.025

5 **Zhang, K., Muhunthan, B.** Numerical investigation of dry and wet mixing processes of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement [Text] // Road Materials and Pavement Design. – 2018. – P. 1–15.

6 **Le Guen, L., Piton, M., Hénault, Q., et al.** Heat convection and radiation in flighted rotary kiln: A minimal model [Text] // Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2017. – Vol. 95. – P. 100–110. – https://doi.org/10.1002/cjce.22659

7 **Huchet, F., Piton, M., Del Barrio, A., et al.** Air-cooling heat exchanger applied to external rotary kiln wall in forced and natural draft [Text] // Energy Conversion and Management. – 2017. – Vol. 154. – P. 517–525. [Electronic resourse]. – https://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.031

8 **Aitmagambetova, G. A., Nikiforov, A. S.** Nekotorye aspekty optimizacionnoj zadachi energoeffektivnoj raboty kompleksa po prokalke koksa [Some aspects of the optimization problem of energy-efficient operation of a coke calcining complex] [Text] // Bulletin of Toraighyrov University. – 2024. – No. 3. – P. 200.

9 **Sednin, V. A.** Modelirovanie, optimizaciya i upravlenie teplotekhnicheskimi sistemami [Modeling, optimization and control of thermal engineering systems] [Text] // Study guide. – Minsk : Belarusian National Technical University (BNTU), 2021. – 68 p.

10 **Gromova, E. N.** Vysokotemperaturnye teplotekhnologicheskie processy i ustanovki [High-temperature thermal engineering processes and installations] [Text] //

Study guide. – St. Petersburg : Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 2020. – Part 1. – 88 p.

Поступило в редакцию 03.04.26.
Поступило с исправлениями 24.04.26.
Принято в печать 31.08.26.

**Г. А. Айтмагамбетова[1], А. С. Никифоров[2]*
[1,2]Торайғыров университеті,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
03.04.26 ж. баспаға түсті.
24.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

КОКСТЫ КҮЙДІРУ ӨНДІРІСІ КЕШЕНІНІҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ТИІМДІЛІГІНЕ КҮЙДІРГІШ ПЕШТІҢ ЖЫЛУ ШЫҒЫНДАРЫНЫҢ ӘСЕРІН ТАЛДАУ

Бұл мақалада күйдіргіш пештің жылу шығынының күйдіргіш мұнай коксын өндіру қондырғысының энергия тиімділігіне әсерін жүйелік талдау ұсынылған. Зерттеу технологиялық ағын диаграммасының бағдарланған графикалық көрінісіне, біріктірілген материал мен жылу балансына және айналмалы пештің көп қабатты цилиндрлік қабырғасы арқылы жылу берудің аналитикалық есептеуіне негізделген.

Пешті қоршап тұрған құрылымдар арқылы жылу шығыны қондырғының кейінгі бөлімшелеріндегі жылу ағындарының таралуына жергілікті ғана емес, сонымен қатар жүйелік әсер ететіні көрсетілген. Жылу шығынын сандық бағалау үшін қоршаған ортамен конвективті және сәулелік жылу алмасуды ескере отырып, көп қабатты цилиндрлік қабырғаның жылу өткізгіштігінің аналитикалық есебі жүргізілді. Параметрлік талдау негізінде, жалпы қалыңдығы 0,392 м тұрақты болатын қаптама мен жылу оқшаулағыш қабатының қалыңдығын қайта бөлу жылу шығынының 0,705–1,297 МВт диапазонында өзгеруіне әкелетіні анықталды. Бағытталған графикті қолдана отырып, пештің жылу шығынын азайту пайдаланылған газ температурасын арттыратыны, қалдық жылу қазандығының жылу жүктемесін арттыратыны және бу мен электр энергиясын өндірудің артуына ықпал ететіні көрсетілді. Нәтижелер кальцинатор пешінің жылу күйінің бүкіл зауыттың энергия тиімділігіне жүйелік әсерін растайды және оны оңтайландыру бағыттарын анықтайды.

Кілтті сөздер: кальцинирленген кокс, кальцинатор пеші, жылу шығыны, энергия тиімділігі, жылу балансы, бағытталған график.

**G. A. Aitmagambetova[1], A. S. Nikiforov[2]*
[1,2]Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 03.04.26.
Received in revised form 24.04.26.
Accepted for publication 31.08.26.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF HEAT LOSSES OF THE CALCINATION FURNACE ON THE ENERGY EFFICIENCY OF A CALCINED COKE PRODUCTION COMPLEX

This article presents a systems analysis of the impact of calcination furnace heat loss on the energy efficiency of a calcined petroleum coke production facility. The study is based on a combination of an oriented graph representation of the process flow diagram, a consolidated material and heat balance, and an analytical calculation of heat transfer through the multilayer cylindrical wall of a rotary kiln.

It is shown that heat loss through the kiln enclosing structures has not only a local but also a systemic impact on the distribution of heat flows in subsequent units of the facility. To quantify heat loss, an analytical calculation of the thermal conductivity of the multilayer cylindrical wall was performed, taking into account convective and radiant heat exchange with the environment. Based on parametric analysis, it was found that redistributing the thicknesses of the lining and thermal insulation layer, with a constant total thickness of 0.392 m, leads to changes in heat loss in the range of 0.705–1.297 MW. Using a directed graph, it was demonstrated that reducing furnace heat loss increases the exhaust gas temperature, increases the heat load of the waste heat boiler, and promotes increased steam and electricity generation. The results confirm the systemic impact of the calciner furnace's thermal state on the energy efficiency of the entire plant and identify areas for its optimization.

Keywords: calcined coke, calciner furnace, heat loss, energy efficiency, heat balance, directed graph.

МРНТИ 44.31.31
https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/42-57

***А. М. Акаев[1], С. И. Миргородский[2], Е. К. Толеубеков[3]**
[1,2,3]Восточно-Казахстанский технический
университет имени Д. Серикбаева,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9390-5703
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-5106-3574
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4024-1151
*e-mail: aybek.akaev.vko_81@mail.ru

МОДЕРНИЗАЦИЯ ГАЗОВЫХ ТУРБИН ДО ПГУ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН

В статье представлен комплексный анализ текущего состояния и перспектив развития электроэнергетической отрасли Республики Казахстан. В ходе исследования была изучена структура генерации и потребления электроэнергии в разрезе трех ключевых энергетических зон страны: Северной, Южной и Западной. Авторами установлено, что в 2021 году выработка электроэнергии составила 114 447,9 млрд кВт·ч, однако существенный рост потребления, особенно в Западной (на 7 %) и Южной (на 9 %) зонах, привел к возникновению острого дефицита маневренных мощностей. Впервые за длительный период Казахстан стал нетто-импортером электроэнергии, что подчеркивает критическую необходимость модернизации существующих генерирующих активов. В качестве основного технологического драйвера для решения проблемы дефицита предлагается внедрение парогазовых установок (ПГУ) на базе действующих газотурбинных станций по схеме надстройки (topping). В работе детально обоснованы технические, экономические и экологические преимущества технологии ПГУ. Показано, что переход на комбинированный цикл позволяет повысить электрический коэффициент полезного действия (КПД) станций с текущих 33–45 % до 58–60 %, одновременно значительно снижая удельные выбросы парниковых газов и потребление воды на единицу выработки. Предложенный подход позволяет сократить сроки ввода новых мощностей до 9–12 месяцев, что является стратегически важным фактором для стабилизации энергосистемы страны в условиях растущего промышленного спроса.

Ключевые слова: электроэнергетика Казахстана, парогазовая установка, ПГУ, генерация электроэнергии, дефицит мощности, энергоэффективность, комбинированный цикл, модернизация ТЭС.

Введение

Промышленность любого государства – это симбиоз отраслей материального производства, которая невозможна без участия электроэнергии. Их функции заключаются в добыче сырья, изготовлении машин, различных товаров, производстве и переработке материалов а также оказании услуг населению.

В промышленности Казахстана главное влияние на экономику оказывают такие отрасли: цветная металлургия; чёрная металлургия; химическая и нефтехимическая индустрия; машиностроение; промышленность строительных материалов; транспорт.

Среди отраслей промышленности Казахстана цветная металлургия выделяется особым масштабом энергопотребления и занимает одну из ключевых позиций в структуре национального производства.

На территории страны выпускается широкий ассортимент товарной продукции: в совокупности освоено производство 25 видов цветных, редких, рассеянных и благородных металлов.

Медные руды. Верифицированные запасы медных руд в Казахстане достигают 37 млн. т., что составляет 5,5 % мирового объёма, обеспечивая республике 4-ю строчку в мировом рейтинге – после Чили, Индонезии и США. На территории страны разведано свыше 90 медных месторождений. По итогам 2020 года ТОО «Казцинк» обеспечило выпуск 60,7 тыс. тонн меди в товарных формах продукции.

Цинковые руды. Запасы цинка, подтверждённые геологоразведкой, составляют 25,7 млн. т. (9,5 % мировых резервов); по данному показателю Казахстан располагается на 4-м месте в мире, уступая Австралии, США и России. Минерально-сырьевая база цинка сформирована более чем в 50 месторождениях, где доминирующим типом руд выступают полиметаллические. ТОО «Казцинк» концентрирует около 87 % отечественного производства металлического цинка (2020 г.), что в абсолютном выражении соответствует 298,2 тыс. тонн.

Свинцовые руды. Разведанные запасы свинца оцениваются в 11,7 млн. т. (10,1 % мировых запасов); по этому параметру республика занимает 6-ю позицию в глобальном рейтинге, располагаясь после России,

Австралии, Канады, США и Китая. Сырьевая база свинца охватывает более 50 месторождений, из которых активная добыча ведётся на 15. Суммарный объём свинца в концентрате, получаемом на казахстанских предприятиях, заметно уступает аналогичным показателям по меди и цинку – в диапазоне 25–50 тыс. т. Лидирующее положение в выпуске свинцового концентрата удерживает компания «Казцинк», на долю которой в 2020 году пришлось свыше 58 % производства, что соответствует 125 тыс. тонн.

Материалы и методы

Выработка электроэнергии в 2021 году по Казахстану составила 114447,9 млрд кВт·ч [1], в том числе:

- тепловыми электростанциями 91164,2 млн.кВт·ч;
- гидроэлектростанциями 9184,9 млн.кВт·ч;
- газотурбинными электростанциями 10701,8 млн.кВт·ч;
- ветряными электростанциями 1758 млн.кВт·ч;
- солнечными электростанциями 1636,5 млн.кВт·ч;
- биогазовые установки 2,5 млн.кВт·ч.

На рисунке 1 изображен сводная диаграмма выработки электроэнергии

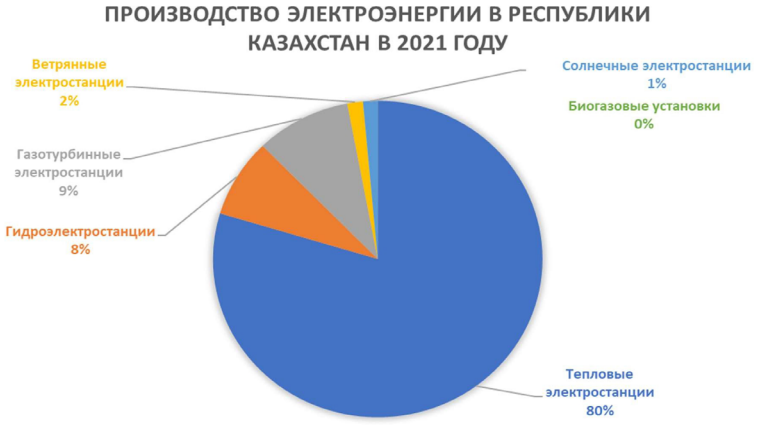


Рисунок-1 – Диаграмма производство электроэнергии в РК в 2021 году

В целом по 2021 году совокупный объём выработки электроэнергии относительно 2020 года вырос на 4751,9 млн.кВт·ч, что соответствует приросту в 5,7 %.

Потребление электроэнергии. По итогам 2021 года объём потребления электроэнергии в Казахстане увеличился на 6545,48 млн.кВт·ч (6 %) относительно предшествующего года и достиг отметки 113890,28 млн.кВт·ч [1]. Зональная динамика складывалась следующим образом: в Западной зоне прирост составил 1013,04 млн.кВт·ч (7 %), в Южной – 2200 млн.кВт·ч (9 %), в Северной – 3331,7 млн.кВт·ч, или 5 % к уровню предыдущего года.

К числу факторов, обусловивших рост потребления по сравнению с 2020 годом, относятся следующие. Первый – наращивание производства в энергоёмких секторах: добыча металлических руд в 2021 году выросла на 4,2 % (в том числе выпуск железорудных окатышей – на 20 %), чёрная металлургия прибавила 2,1 %, нефтепереработка – 6,7 %, химическая промышленность – 8,3 %, машиностроение – 20,4 %, водоснабжение – 9,5 %. Крупные промышленные предприятия традиционно поглощают до 40 % всей генерируемой в стране электроэнергии, однако их производственный подъём лишь воспроизвёл стандартную траекторию спроса: в период 2010–2020 годов среднегодовой прирост генерации составлял 2,9 %. Второй фактор – расширение мощностей криптовалютного майнинга. По оценкам KEGOC, в октябре 2021 года майнеры потребляли до 1000 МВт при располагаемой мощности энергосистемы на уровне 19000 МВт, причём около 40 % их потребления приходилось на так называемых «серых» майнеров, подключавшихся к сети под видом промышленных предприятий или домохозяйств. Пиковый спрос пришёлся на период, когда электростанции, работавшие на предельных режимах и урезавшие капитальные вложения после многолетней заморозки тарифов, начали поочерёдно выводить оборудование в аварийные остановы. По данным KEGOC (октябрь 2021 года), суммарная продолжительность аварийных отключений генерации с начала года выросла на 25 % относительно 2020-го; при этом длительность аварийных остановов турбоагрегатов увеличилась вдвое, газовых турбин – на 43 %, блочного оборудования – на 18 %. Возникший дефицит не позволял выводить мощности на плановые ремонты, что дополнительно провоцировало аварийные остановки. Впервые за длительный период Казахстан перешёл в категорию нетто-импортёра электроэнергии: импорт составил 2,1 млрд кВт.ч при экспорте в 1,9 млрд кВт.ч [2]. На фоне роста цен на сырьё и материалы и высокой потребительской инфляции с 1 апреля 2021 года Минэнерго повторно скорректировало предельные тарифы на электроэнергию, подняв их в среднем на 15 %, тогда как сами электростанции добивались повышения на 36 % [3]. Тарифная корректировка, однако, не трансформировалась в рост капитальных вложений: инвестиции в энергетическом секторе продолжили снижение – после падения на 20,5 %

в 2020 году в 2021-м они сократились ещё на 4,9 %. Энергетические компании фиксировали отток высококвалифицированных кадров вследствие низкого уровня оплаты труда. По итогам 2021 года реальная заработная плата в энергетическом секторе (включая теплоэнергетику и газораспределение) увеличилась на 8,8 % против среднего по экономике показателя в 8,7 %.

Стоимость электрической энергии

Стоимость электрической энергии у производителей в настоящее время определяется регулируемыми государством предельными тарифами, определенными Постановлением Правительства РК от 30 июня 2022 года № 226 [3]. В соответствии с данным Постановлением все энергопроизводящие компании разделены на группы с одинаковым уровнем предельных цен. Предельная стоимость электроэнергии и группы компаний указаны в таблицах 1, 2.

Таблица-1 – Предельные тарифы групп ЭПО.

Группа энергопроизводящих организаций, реализующих ЭЭ	**Предельные тарифы на электрическую энергию по годам, тенге/кВт·ч**						
	2019 год	**2020 год**	**2021 год**	**2022 год**	**2023 год**	**2024 год**	**2025 год**
1-группа	5,76	5,80	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90
2-группа	4,50	5,55	5,59	6,17	6,17	6,17	6,17
3-группа	7,73	9,13	8,59	8,59	8,59	8,59	8,59
4-группа	5,83	7,50	7,91	8,78	8,78	8,78	8,78
5-группа	8,10	9,10	10,45	11,32	11,32	11,32	11,32
6-группа	6,70	7,91	8,78	9,86	9,86	9,86	9,86
7-группа	6,44	7,72	8,48	9,45	9,45	9,45	9,45
8-группа	6,70	8,38	9,44	10,90	10,90	10,90	10,90
9-группа	5,06	6,17	6,70	7,19	7,19	7,19	7,19
10-группа	6,60	8,29	9,49	10,67	10,67	10,67	10,67
11-группа	7,00	7,00	6,77	6,77	6,77	6,77	6,77
12-группа	4,03	4,80	4,93	5,39	5,39	5,39	5,39
13-группа	8,42	10,39	12,02	13,52	13,52	13,52	13,52
14-группа	7,80	10,10	12,68	13,93	13,93	13,93	13,93
15-группа	8,20	9,50	10,70	11,41	11,41	11,41	11,41
16-группа	7,57	8,86	10,53	10,53	10,53	10,53	10,53

17-группа	10,20	11,78	11,97	12,98	12,98	12,98	12,98
18-группа	8,00	9,95	11,66	12,12	12,12	12,12	12,12
19-группа	6,30	6,30	5,76	6,36	6,36	6,36	6,36
20-группа	6,82	8,48	13,24	14,49	14,49	14,49	14,49
21-группа	6,54	8,10	8,10	8,86	8,86	8,86	8,86
22-группа	7,30	7,30	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07
23-группа	6,40	8,67	8,44	8,44	8,44	8,44	8,44
24-группа	6,33	7,61	7,28	7,28	7,28	7,28	7,28
25-группа	6,57	9,47	8,89	9,82	9,82	9,82	9,82
26-группа	8,70	10,30	10,23	11,19	11,19	11,19	11,19
27-группа	12,12	13,10	13,04	14,87	14,87	14,87	14,87
28-группа	8,95	10,02	11,44	11,44	11,44	11,44	11,44
29-группа	10,55	11,81	11,43	11,97	11,97	11,97	11,97
30-группа	7,60	7,60	7,60	7,60	7,60	7,60	7,60
31-группа	8,94	10,40	12,44	12,44	12,44	12,44	12,44
32-группа	1,10	1,10	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46
33-группа	2,43	3,44	2,85	3,20	3,20	3,20	3,20
34-группа	1,86	2,59	2,14	2,40	2,40	2,40	2,40
35-группа	8,72	8,10	8,77	9,82	9,82	9,82	9,82
36-группа	12,02	12,02	10,90	11,71	11,71	11,71	11,71
37-группа	8,78	10,80	13,05	13,05	13,05	13,05	13,05
38-группа	13,68	15,46	15,04	15,04	15,04	15,04	15,04
39-группа	10,02	11,30	12,34	12,34	12,34	12,34	12,34
40-группа	9,24	11,30	11,58	11,58	11,58	11,58	11,58
41-группа	8,76	8,76	8,53	8,53	8,53	8,53	8,53
42-группа	11,38	12,78	12,35	12,35	12,35	12,35	12,35
43-группа	7,00	7,00	7,48	7,48	7,48	7,48	7,48
44-группа	7,39	7,39	7,16	8,05	8,05	8,05	8,05
45-группа	-	12,10	10,67	10,67	10,67	10,67	10,67
46-группа	-	-	16,92	16,92	16,92	16,92	16,92
47-группа	-	-	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17

Таблица-2 – Группы энергопроизводящих организаций, реализующих электрическую энергию

Группы	Наименование энергопроизводящих организаций
1-группа	ТОО «Экибастузская ГРЭС-1 им. Б.Нуржанова»
2-группа	АО «Евроазиатская энергетическая корпорация»
3-группа	АО «Станция Экибастузская ГРЭС-2»
4-группа	ТОО «Главная распределительная энергостанция Топар»
5-группа	АО «Жамбылская ГРЭС им. Т.И. Батурова»
6-группа	ТОО «Караганда Энергоцентр»
7-группа	ТОО «Усть-Каменогорская ТЭЦ»
8-группа	АО «Севказэнерго»
9-группа	АО «Астана-Энергия»
10-группа	АО «Павлодарэнерго» (ТЭЦ-2,3)
11-группа	АО «АрселорМиттал Темиртау» ТЭЦ-2, ТЭЦ-ПВС
12-группа	АО «Алюминий Казахстана»
13-группа	ТОО «Казахмыс Энерджи» (ЖТЭЦ, БТЭЦ)
14-группа	АО «Риддер ТЭЦ»
15-группа	ТОО «Согринская ТЭЦ»
16-группа	ТОО «Bassel Group LLS»
17-группа	ТОО «Текелийский энергокомплекс»
18-группа	ТОО «Степногорская ТЭЦ»
19-группа	ТОО «Шахтинсктеплоэнерго»
20-группа	АО «Атырауская ТЭЦ»
21-группа	АО «Актобе ТЭЦ»
22-группа	ГКП «Кентау Сервис»
23-группа	ГКП «Аркалыкская ТЭК»
24-группа	ГКП «Костанайская ТЭК»
25-группа	АО «Жайыктеплоэнерго»
26-группа	АО «Алматинские электрические станции» ТЭЦ-1,2,3 Капшагайская ГЭС, Каскад ГЭС
27-группа	ТОО «МАЭК-Казатомпром»
28-группа	ТОО «Жанажолская ГТЭС»

29-группа	ТОО «Уральская ГТЭС»
30-группа	ТОО «Жайыкмунай»
31-группа	АО «Кристалл Менеджмент»
3 2-группа	Бухтарминская ГЭК ТОО «Казцинк»
33-группа	ТОО «АЭС Шульбинская ГЭС»
34-группа	ТОО «АЭС Усть-Каменогорская ГЭС»
35-группа	АО «Шардаринская ГЭС»
36-группа	АО «Мойнакская ГЭС им. У.Д. Кантаева»
37-группа	ТОО «Актюбинский рельсобалочный завод»
38-группа	ТОО «Sagat Energy»
39-группа	АО «3-Энергоорталык»
40-группа	ГКП «Кызылордатеплоэлектроцентр»
41-группа	АО «Таразэнергоцентр»
42-группа	ТОО «Батые Пауэр»
43-группа	ТОО «УПНК-ПВ»
44-группа	ГКП «Теплокоммунэнерго»
45-группа	ТОО «Karabatan Utility Solution»
46-группа	ТОО «ОралМунайПром»
47-группа	ТОО «EPC Industry»

Из таблицы 2 видно, что для уменьшения себестоимости выпускаемой продукции в ТОО «Казцинк», передана Бухтарминская ГЭС, имеющая самый низкий тариф на электроэнергию1,46 тенге на 1 кВт.ч, в других группах тариф достигает 16,92 кВт.ч.

Результаты и обсуждение

Электроэнергетика выступает фундаментальной отраслью казахстанской экономики. Бесперебойная подача электрической и тепловой энергии потребителям представляет собой несущую опору хозяйственного развития страны и непременное условие обеспечения достойного уровня жизни населения.

В территориальном отношении энергетика Казахстана организована в три самостоятельные зоны. Северная зона охватывает Восточно-Казахстанскую, Павлодарскую, Акмолинскую, Карагандинскую, Северо-Казахстанскую, Костанайскую и Актюбинскую области, а также столицу республики – город Астану [4].

Северная зона играет системообразующую роль в структуре ЕЭС Казахстана: здесь сконцентрировано 72,5 % совокупной генерирующей мощности страны, а разветвлённые электрические сети напряжением 220–500–1150 кВ обеспечивают её сопряжение с ЕЭС России. Зона располагает устойчивым профицитом электроэнергии, за счёт которого покрывается дефицит южного региона республики и осуществляется экспортная передача мощности в Россию.

Южная зона включает Алматинскую, Жамбылскую, Кызылординскую и Южно-Казахстанскую области, город Алматы, а также район Байконура. Ограниченность собственной топливно-энергетической ресурсной базы и, как следствие, недостаточность располагаемых генерирующих мощностей предопределяют хронически дефицитный характер энергобаланса данной зоны. В частности, в 2009 году при суммарной потребности в электроэнергии 15,02 млрд. кВт·ч дефицит составил 6,85 млрд. кВт·ч.

Восполнение образующегося дефицита обеспечивается посредством транзитных перетоков по направлению Север – Юг Казахстана, а также за счёт импортных поставок из ОЭС Центральной Азии. Южная зона функционирует в единой сетевой связке с Кыргызстаном и Узбекистаном; пропускная способность межгосударственных электрических связей позволяет организовать передачу электроэнергии как из Центральной Азии в Казахстан, так и в обратном направлении, в объёме до 8–9 млрд. кВт·ч.

Западная зона, объединяющая Атыраускую, Западно-Казахстанскую и Мангистаускую области, лишена электрических связей с ЕЭС Казахстана в пределах территории республики. Частичное покрытие региональной потребности в электроэнергии обеспечивается за счёт импорта из России. Три области зоны соединены между собой протяжённым одноцепным транзитом длиной около 1400 км на напряжении 220 кВ. Атырауский энергоузел связан с Астраханским энергоузлом России по ЛЭП-110 кВ, тогда как Западно-Казахстанская область располагает тремя воздушными линиями 220 кВ, выходящими на ОЭС Средней Волги.

На сегодняшний день энергетическая отрасль Республики Казахстан характеризуется следующими структурными особенностями. Шестьдесят процентов генерирующих мощностей сконцентрировано в Северной зоне. Восточный Казахстан располагает крупными гидроэлектростанциями и необходимыми резервами мощности. В Южной зоне сохраняется дефицит мощности и электроэнергии, восполняемый транзитными поставками с севера и импортом из Центральной Азии – преимущественно регулирующей мощности. Западные области республики остаются зависимыми

от российских поставок, а в целом по стране ощущается нехватка маневренных источников для прохождения пиковых нагрузок.

Располагая значительными запасами первичных энергетических ресурсов, Казахстан имеет реальные предпосылки не только для полного самообеспечения электроэнергией и наращивания её экспорта, но и для привлечения на свою территорию энергоёмких экспортоориентированных производств в условиях глобальной конкуренции.

Северная зона (Северный, Центральный и Восточный Казахстан) устойчиво сохраняет статус энергоизбыточной. Прогнозный баланс зоны с учётом реализации программ реконструкции и расширения действующих электростанций свидетельствует о сохранении профицита вплоть до 2028 года [5]. Западный Казахстан, несмотря на собственные запасы углеводородного сырья, по-прежнему частично импортирует электроэнергию из России. Освоение имеющихся топливных ресурсов открывает возможность в короткие сроки обеспечить потребности региона и сформировать экспортный потенциал путём ввода новых мощностей на базе попутного газа нефтяных месторождений с применением технологий газотурбинного и парогазового циклов. Энергетика Южного Казахстана (Алматинская, Жамбылская, Кызылординская и Южно-Казахстанская области) функционирует на привозных углях и импортном газе, покрывая дефицит за счёт поставок от северных энергоисточников и импорта из республик Центральной Азии.

По итогам 2021 года выработка электроэнергии в ЕЭС Казахстана превысила потребление на 557,62 млн. кВт·ч, что формирует дополнительный импульс для развития экономики.

В большинстве развитых государств ведущую роль в производстве электроэнергии играют тепловые станции различного типа. Среди них наиболее экономичными признаются комбинированные установки, представляющие собой последовательное соединение газовой и паровой турбин. Электростанции на базе парогазовых установок (ПГУ) достигают КПД порядка 58 % и отличаются значительно меньшим объёмом выбросов парниковых газов [6; 7].

Принцип действия ПГУ основан на совместном использовании газотурбинного и парового циклов. В газотурбинном модуле сжигается природный газ или дизельное топливо; образующиеся горячие газы приводят в движение турбину, ротор которой вращает электрогенератор. После срабатывания в турбине отходящие газы сохраняют высокую температуру при давлении, близком к атмосферному, что указывает на неполную реализацию их энергетического потенциала [8].

Одновальные ПГУ с объединённым валом для паровой и газовой турбин получили широкое распространение; как правило, они оснащаются одним двухприводным генератором и способны работать как в комбинированном цикле, так и в базовом газовом режиме при отключённой паровой турбине. В ряде случаев пар от нескольких газотурбинных установок аккумулируется в единой системе паропроизводства через котлы-утилизаторы. Многовальные схемы включают один или несколько газотурбинных агрегатов и паропроизводящие котлы, подающие пар одним трубопроводом к паровой турбине, однако начальные капиталовложения в такие системы превышают аналогичные затраты примерно на 5 %.

Несмотря на то что эффективность комбинированного парогазового цикла была обоснована ещё в середине XX века в работах советского учёного С. А. Христиановича, широкого распространения в СССР подобные установки так и не получили: были реализованы лишь отдельные пилотные проекты – энергоблоки мощностью 170 МВт на Невинномысской ТЭЦ и 250 МВт на Молдавской ГРЭС. За последнее десятилетие в Российской Федерации введено в эксплуатацию свыше сорока пяти крупных парогазовых энергоблоков.

По сравнению с Россией в странах Западной Европы и США парогазовые установки стали широко применяться раньше. На западных ТЭС, использующих в качестве топлива природный газ, установки такого типа используются гораздо чаще.

Преимущества ПГУ

Электрический КПД парогазовых установок превышает 60 %, что принципиально выгодно отличает их от раздельных циклов: паросиловые установки ограничены показателями 33–45 %, газотурбинные – 28–42 % [9]. С точки зрения экономики строительства ПГУ выделяются низкой удельной стоимостью установленной мощности и короткими сроками возведения – от 9 до 12 месяцев. Расход воды на единицу выработанной электроэнергии у них существенно ниже, чем в традиционных паросиловых циклах, а отсутствие зависимости от регулярного подвоза топлива железнодорожным или морским транспортом обеспечивает логистическую самостоятельность. Компактные габариты установок допускают их размещение непосредственно в городской черте или на площадках промышленных предприятий, что сокращает капитальные затраты на строительство ЛЭП и снижает потери при транспортировке энергии. В экологическом отношении ПГУ превосходят классические паротурбинные системы по уровню воздействия на окружающую среду. Применительно к Казахстану, где на долю газотурбинных установок приходится 9 % генерации в энергодефицитных зонах, дооснащение

действующих ГТУ паровыми контурами представляет собой один из наиболее доступных способов наращивания располагаемой мощности.

Недостатки ПГУ

Газотурбинные узлы предъявляют повышенные требования к чистоте рабочего тела, что обусловливает необходимость обязательной многоступенчатой фильтрации атмосферного воздуха, подаваемого в камеру сгорания. В части топливного режима основным энергоносителем для ПГУ служит природный газ, резервным – дизельное топливо; применение твёрдого топлива технически реализуемо лишь посредством внутрицикловой газификации угля, что влечёт за собой значительный рост капитальных затрат. Данное обстоятельство жёстко привязывает станции к дорогостоящей газотранспортной инфраструктуре. Ещё одним ограничением является климатическая зависимость выходных параметров: располагаемая электрическая мощность установки варьируется в зависимости от сезона и достигает пиковых значений при низких температурах наружного воздуха в зимний период.

Выводы

Проведенный анализ показывает, что энергетическая система Казахстана нуждается в срочной модернизации и вводе новых маневренных мощностей, особенно в Южной и Западной зонах. Использование технологии парогазового цикла на базе существующих газовых турбин является наиболее эффективным драйвером развития отрасли. Это позволит повысить КПД станций до 58–60 %, сократить сроки строительства до 9-12 месяцев и существенно улучшить экологические показатели выработки энергии [10].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Отчет «Анализ рынка электроэнергии и угля Республики Казахстан январь-декабрь 2021 года» / Департамент «Развитие рынка» АО «Самрук-Энерго». 2022. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.samruk-energy.kz (Дата обращения: 29.12.2025).

2 **Домнин, С.** В 2021 году электроэнергетика Республики Казахстан подошла к пределу своих возможностей / Kursiv Media. 2022. [Электронный ресурс]. – URL: https://kz.kursiv.media/2022-04-14/v-2021-godu-elektroenergetika-rk-podoshla-kpredelu-svoih-vozmozhnostej/.

3 О внесении изменения в приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 14 декабря 2018 года № 514 «Об утверждении предельных тарифов на электрическую энергию»: приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 30 июня 2022 года №226.

4 Электроэнергетика Республики Казахстан: ключевые факты / АО «KEGOC». [Электронный ресурс]. – URL: https://www.kegoc.kz/ru/electric-power/elektroenergetika-kazakhstana (Дата обращения: 29.12.2025).

5 Постановление Правительства Республики Казахстан № 1129 «Об утверждении Программы по развитию электроэнергетики в Республике Казахстан на 2010–2014 годы» от 29 октября 2010 года. [Электронный ресурс]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/P1000001129

6 **Панченко, И. Н., Сушко, С. Н.** Парогазовые установки: преимущества, недостатки и перспективы развития // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Иркутск : ИРНИТУ, 2019. – Т. 1. – С. 116–120.

7 **Рындин, В. В., Рындина, Д. В.** Систематизация коэффициентов полезного действия тепловых двигателей // Наука и техника Республики Казахстан. – 2006. – № 1. – С. 61-70.

8 **Кириллин, В. А., Сычев, В. В., Шейндлин, А. Е.** Техническая термодинамика: учебник для вузов. М. : Издательский дом МЭИ, 2016. – 496 с.

9 **Ерофеев, В. Л., Жуков, В. А., Пряхин, А. С.** Энергетический и эксергетический подходы к оценке повышения эффективности тепловых двигателей // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2017. № 5. [Электронный ресурс]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/energeticheskiy-i-eksergeticheskiy-podhody-k-otsenke-povysheniya-effektivnosti-teplovyh-dvigateley/viewer (Дата обращения: 29.12.2025).

10 Закон Республики Казахстан № 165-IV «О поддержке использования возобновляемых источников энергии» от 4 июля 2009 года № 165-IV. [Электронный ресурс]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z090000165_

REFERENCES

1 Report «Analysis of the electricity and coal market of the Republic of Kazakhstan January-December 2021» / Department «Market Development» of Samruk-Energy JSC. – 2022. [Electronic resource]. – URL: https://www.samruk-energy.kz (Accessed: 29.12.2025). [in Russian]

2 **Domnin, S.** In 2021, the electric power industry of the Republic of Kazakhstan approached the limit of its capabilities / Kursiv Media. – 2022. [Electronic resource]. – URL: https://kz.kursiv.media/2022-04-14/v-2021-godu-elektroenergetika-rk-podoshla-kpredelu-svoih-vozmozhnostej/ (Accessed: 29.12.2025). [in Russian]

3 On amendments to the order of the Minister of Energy of the Republic of Kazakhstan dated December 14, 2018 No. 514 «On approval of maximum tariffs

for electrical energy»: order of the Minister of Energy of the Republic of Kazakhstan dated June 30, 2022. [in Russian]

4 Electric power industry of the Republic of Kazakhstan: key facts / KEGOC JSC. [Electronic resource]. – URL: https://www.kegoc.kz/ru/electric-power/elektroenergetika-kazakhstana (Accessed: 29.12.2025). [in Russian]

5 Decree of the Government of the Republic of Kazakhstan No. 1129 «On approval of the Program for the development of the electric power industry in the Republic of Kazakhstan for 2010–2014» dated October 29, 2010. [Electronic resource]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/P1000001129 [in Russian]

6 **Panchenko, I. N., Sushko, S. N.** Combined cycle plants: advantages, disadvantages and development prospects // Improving the efficiency of energy production and use in Siberia: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. – Irkutsk: IRNITU, 2019. – Vol. 1. – P. 116–120. [in Russian]

7 **Ryndin, V. V., Ryndina, D. V.** Systematization of efficiency coefficients of heat engines // Science and technology of the Republic of Kazakhstan. – 2006. – No. 1. – P. 61-70. [in Russian]

8 **Kirillin, V. A., Sychev, V. V., Sheindlin, A. E.** Technical thermodynamics : textbook for universities. – Moscow: MPEI Publishing House, 2016. – 496 p. [in Russian]

9 **Erofeev, V. L., Zhukov, V. A., Pryakhin, A. S.** Energy and exergy approaches to evaluating the efficiency improvement of heat engines // Bulletin of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. – 2017. – No. 5. [Electronic resource]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ (Accessed: 25.06.2025). [in Russian]

10 Law of the Republic of Kazakhstan No. 165-IV «On Support for the Use of Renewable Energy Sources» dated July 4, 2009. – № 165-IV. [Electronic resource]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z090000165_ [in Russian]

Поступило в редакцию 29.12.25.
Поступило с исправлениями 05.05.26.
Принято в печать 31.08.26.

**А. М. Ақаев[1], С. И. Миргородский[2], Е. Қ. Төлеубеков[3]*
[1,2,3]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.
29.12.25 ж. баспаға түсті.
05.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ГАЗ ТУРБИНАЛАРЫН БУ-ГАЗ ҚОНДЫРҒЫСЫНА ЖАҢҒЫРТУ АРҚЫЛЫ ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДА ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫН ӨНДІРУДІ ҰЛҒАЙТУ

Мақалада Қазақстан Республикасының электр энергетикасы саласының қазіргі жай-күйі мен даму перспективаларына кешенді талдау жасалған. Зерттеу барысында елдің үш негізгі энергетикалық аймағы: Солтүстік, Оңтүстік және Батыс бөлінісінде электр энергиясын өндіру мен тұтыну құрылымы зерделенді. Авторлар 2021 жылы электр энергиясын өндіру 114, 447,9 млрд кВт·саг құрағанын анықтады, алайда Батыс (7 %-ға) және Оңтүстік (9 %-ға) аймақтарда тұтынудың айтарлықтай өсуі маневрлік қуаттар тапшылығының туындауына әкелді. Ұзақ уақыт ішінде алғаш рет Қазақстан электр энергиясының нетто-импортеры болды, бұл генерациялаушы активтерді жаңғыртудың өзектілігін көрсетеді. Тапшылық мәселесін шешудің негізгі технологиялық драйвері ретінде қолданыстағы газ турбиналық станциялар базасында жаңғырту схемасы (topping) бойынша бу-газ қондырғыларын (БГҚ) енгізу ұсынылады. Жұмыста БГҚ технологиясының техникалық, экономикалық және экологиялық артықшылықтары егжей-тегжейлі негізделген. Комбинирленген циклді пайдалану станциялардың электрлік пайдалы әсер коэффициентін (ПӘК) 33–45 %-дан 58–60 %-ға дейін арттыруға, сонымен бірге парниктік газдардың меншікті шығарындыларын және су тұтынуды азайтуға мүмкіндік беретіні көрсетілген. Ұсынылған тәсіл жаңа қуаттарды іске қосу мерзімдерін 9–12 айға дейін қысқартуға мүмкіндік береді, бұл өнеркәсіптік тұтынудың өсуі жағдайында елдің энергия жүйесін тұрақтандыру үшін өте маңызды стратегиялық фактор болып табылады.

Кілтті сөздер: Қазақстан электр энергетикасы, бу-газ қондырғысы, БГҚ, электр энергиясын өндіру, қуат тапшылығы, энергия тиімділігі, аралас цикл, ЖЭС жаңғырту.

**A. M. Akayev[1], S. I. Mirgorodskiy[2], Y. K. Toleubekov[3]*
[1,2,3]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk.
Received 29.12.25.
Received in revised form 05.05.26.
Accepted for publication 31.08.26.

MODERNIZATION OF GAS TURBINES TO CCGT FOR INCREASING ELECTRICITY GENERATION IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

The article presents a comprehensive analysis of the current state and development prospects of the electric power industry of the Republic of Kazakhstan. During the research, the structure of electricity generation and consumption was studied across three key energy zones of the country: Northern, Southern, and Western. The authors established that in 2021, electricity generation amounted to 114,447.9 billion kWh; however, significant growth in consumption, particularly in the Western (by 7 %) and Southern (by 9 %) zones, led to an acute shortage of maneuverable capacities. For the first time in a long period, Kazakhstan became a net importer of electricity, which emphasizes the critical urgency of modernizing existing generating assets. As the primary technological driver for solving the deficit problem, the introduction of combined cycle gas turbine (CCGT) plants based on existing gas turbine stations according to the topping modernization scheme is proposed. The paper provides a detailed justification of the technical, economic, and environmental advantages of CCGT technology. It is shown that transitioning to a combined cycle allows increasing the electrical efficiency of stations from the current 33–45 % to 58–60 %, while simultaneously significantly reducing specific greenhouse gas emissions and water consumption per unit of generation. The proposed approach allows reducing the timeframe for commissioning new capacities to 9–12 months, which is a strategically important factor for stabilizing the country's energy system in the context of growing industrial demand.

Keywords: Kazakhstan's power industry, combined cycle gas turbine, CCGT, power generation, power shortage, energy efficiency, combined cycle, TPP modernization.

МРНТИ 44.29.01

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/58-71

А. Т. Апсеметова[1], Ж. С. Шыныбай[2], К. Е. Арыстанбаев[3], Р. М. Чимкентбаева[4]

[1,4]Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Республика Казахстан, г. Шымкент;
[2]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;
[3]Южно-Казахстанская медицинская академия, Республика Казахстан, г. Шымкент.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0515-6648
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9310-0339
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9499-192X
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3124-6051
*e-mail: aaizgan@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ГОРОДСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

В данной работе представлены результаты прогнозирования электропотребления социально значимых объектов мегаполиса Шымкент. Специфика изменений мегаполиса – сезонные колебания энергопотребления в течение года, которые требуют перехода к адаптивным моделям управления и способных оптимизировать распределение городских мощностей. Одним из методов повышения эффективности в процессе управления электроэнергией является прогнозирование. Однако для обеспечения точности результатов необходим детальный анализ. Учет данных о ежемесячной нагрузке электроэнергии в течение года позволяет прогнозировать энергопотребление городской среды, что дает возможность управлять на системном уровне.

Основной фактор, влияющий на энергопотребление – сезонность, определяет тенденцию развития потребления. Поэтому актуальным направлением исследования является совершенствование существующих и разработка новых методов прогнозирования.

Целью данной работы является анализ и прогнозирование энергопотребления объектов городской инфраструктуры инструментами мультипликативного моделирования. На основе фактических данных электропотребления основных объектов города Шымкент за 2023–2024 гг. был проведен анализ с применением линейной модели тренда. Выполнена проверка адекватности модели с использованием критерия Фишера и коэффициента детерминации. Было определено, что для описания тенденции роста энергопотребления наиболее эффективным является линейный тренд с мультипликативной коррекцией на сезонность.

Ключевые слова: мультипликативная модель, прогнозирование, электропотребление, моделирование, регрессионный анализ.

Введение

Современная городская среда представляет собой динамично развивающуюся систему, функционирование которой тесно связана с бесперебойным обеспечением электроэнергией. Энергетическая инфраструктура города претерпевает значительную трансформацию, которая обусловлена ростом плотности населения и интеграцией интеллектуальных технологий в городскую среду. Быстрое градостроительное развитие города Шымкент, масштабное жилищное строительство, модернизация социальной инфраструктры и развитие экологически устойчивых районов приводит к значительному росту энергопотребления. Этот фактор существенно влияет на распределительные сети электроэнергии, которые требуют строительства новых инженерных сетей и модернизацию существующих для обеспечения стабильного энергоснабжения.

Значительное влияние на структуру потребления электроэнергии оказывают объекты социальной и образовательной инфраструктуры. В отличие от промышленных предприятий, которые имеют стабильный технологический цикл, образовательные учреждения характеризуются неравномерностью использования электроэнергии. Такие колебания продиктованы календарными циклами и ритмами жизни города, тем самым создавая зоны высокой неопределенности для операторов распределительных систем.

Эффективная эксплуатация городских распределительных сетей невозможна без понимания закономерностей таких процессов. В основе анализа распределения энергетических потоков лежит необходимость моделирования потребления электроэнергии. Системный анализ и прогнозирование становятся фундаментальной базой формирования

необходимого базиса для внедрения гибких механизмов управления энергосистемами мегаполиса [1; 2].

Прогнозирование электропотребления позволяет снизить пиковые нагрузки и минимизировать экономические потери. В условиях городской среды временные ряды энергопотребления характеризуются выраженным трендом и сезонными колебаниями.

В данной статье предлагается анализ и прогнозирование потребления электрической энергии инфраструктуры города Шымкент на основе мультипликативной прогнозной модели. В качестве объекта исследования выбраны статистические данные потребления электроэнергии основных объектов города Шымкент за 2023 – 2024 года. Построение мультипликативной модели потребления электроэнергии позволит получить предиктивные значения среднесрочного планирования, минимизировать риски и оптимизировать распределение энергетических мощностей.

Материалы и методы

Прогнозирование энергопотребления позиционируется как предиктивное моделирование динамических характеристик временных рядов электрических нагрузок. Его функция заключается в минимизации неопределенности относительно будущих режимов работы распределительных сетей. Методология прогнозирования ориентирована на выявление трендов в потреблении электроэнергии на основе статистической обработки данных. Данный подход предпологает, что предиктивное состояние энергопотребления является функцией от его предшествующих состояний и актуальных параметров функционирования сети.

Рассмотрим городскую среду не как единое пятно застройки, а как совокупность дискретных зон. Городская инфраструктура в данной модели представляется в виде суммы основных сегментов таких как, социально-образовательный, промышленно-коммунальный, жилой и коммерческий, каждый из которых имеет свою сезонность.

Применение мультипликативного эффекта позволяет сформировывать цикличность энергопотребления. Основным преимуществом такого подхола является возможность прогнозирования сезонной компоненты, которая в свою очередь в условиях необходимого жизнеобеспечения мегаполиса имеет жесткую привязку к сезонности.

Для проведения анализа рассмотрены основные объекты энергопотребители города Шымкент в разрезе по месяцам за 2023 – 2024 года на примере одного частного дома, одной 2х комнатной квартира не использующей электрической плиты, одной 2х комнатной квартиры с использованием электроплиты, одной среднеобразовательной школы, одного детского сада, одного малого

предприятия, одного предприятия ТОО. Статистические данные получены от ТОО «Оңтүстік Жарық Транзит» электростетвой компании в городе Шымкент и Туркестанской области, обеспечивающей передачу электрическй энергии, модернизацию сетей и бесперебойное снабжение энергопотребителей, приведены на рисунке 1. Данные указаны в кВт·ч (киловатт-часах).

в/п №	Объект	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	итого за год
1	Частный дом 2023г.	248	215	235	208	179	197	293	468	164	198	222	237	**2864**
	Частный дом 2024г.	255	211	248	205	256	398	587	389	217	212	222	259	**3459**
2	2х комнатная квартира, не использующая электроплиты 2023г.	157	197	212	256	85	218	216	308	196	115	243	155	**2358**
	2х комнатная квартира, не использующая электроплиты 2024г.	203	213	330	221	213	258	350	230	210	213	225	204	**2870**
3	2х комнатная квартира, использующая электроплиты 2023г.	563	494	508	505	456	398	256	249	232	331	348	370	**4710**
	2х комнатная квартира, не использующая электроплиты 2024г.	350	255	270	284	272	309	360	195	155	169	148	125	**2892**
4	Среднеобразовательная школа 2023г.	9739	10798	10996	5992	10979	5050	1118	1098	5874	10995	11414	12556	**96609**
	Среднеобразовательная школа 2024г.	8800	12408	11169	8811	9684	4152	1202	856	10080	11000	10307	11502	**99971**
5	Детский сад 2023 г.	4260	6030	3420	2820	3180	3060	2280	2100	2280	3000	4020	4200	**40650**
	Детский сад 2024 г.	3240	3840	3540	3300	2700	2520	2040	2400	2400	3180	3240	3240	**35640**
6	Высшее учебное заведение 2023 г.	342963	320224	243601	288756	183088	244141	143570	87008	141378	244823	381828	292301	**2913681**
	Высшее учебное заведение 2024 г.	300099	362990	296080	258644	236889	204461	147977	146202	214784	372554	233395	374114	**3148189**
7	Малое предприятие 2023г.	351	280	2104	3003	3495	4065	5158	5997	3915	4709	4848	2887	**40812**
	Малое предприятие 2024г.	1924	3118	4908	7600	8382	5458	6168	6382	5620	6966	8120	4923	**69569**
8	Предприятие ТОО 2023 г.	208716	207839	216069	203507	217175	206855	247278	261118	238179	255373	242159	298522	**2802790**
	Предприятие ТОО 2024 г.	247324	239514	249119	230938	242621	289611	314224	293686	266918	305664	320268	302000	**3301887**
	Итого:													**12568951**
	Итого 2023 год	566997	546077	477145	505047	418637	463984	400169	358346	392218	519544	645082	611228	**5904474**
	Итого 2024 год	562195	622549	565664	510003	501017	507167	472908	450340	500384	699958	575925	696367	**6664477**
	Итого:													**12568951**

Данные указаны в кВт·ч (киловатт-часах)

Рисунок 1 – Электропотребление основных объектов города Шымкент

Метод моделирования сезонных колебаний заключается в расчете значений сезонной компоненты методом скользящей средней и построении мультипликативной прогнозной модели временных рядов.

Характер энергопотребления показывает зависимость от времени года и темпов расширения жилого сектора, т.е показывает наличие сезонных колебаний. Наблюдается темп роста, т.е общий объем энергопотребления по всем объектам увеличился примерно на 12,8 %. Выявлены выраженные пики нагрузки в июле из-за климатического фактора, а также спады потребления в образовательном секторе в летний период из-за каникул.

Эффективное планирование энергетических мощностей города требует высокой точности прогнозирования [3; 4]. Электропотребление

представляет собой сложный вопрос, сочетающий в себе рост населения и цифровизацию, пиковые потребления зимой и летом, аномальные погодные условия. Для процессов с возрастающей амплитудой сезонных колебаний и с учетом ярко выраженной специфики временных рядов целесообразно использовать мультипликативную модель. В основу мультипликативной модели заложен принцип системного выявления связей между трендовой и сезонной компонентами, что важно для получения прогнозных значений в условиях динамично развивающейся инфраструктуры.

Мультипликативная модель предполагает, что каждый уровень временного ряда представлен как произведение трендовой составляющей (T), сезонной компоненты (S) и составляющей случайных ошибок (E) и в общем случае выглядит в виде:

$$Y = T \cdot S \cdot E \tag{1}$$

Определение наиболее точной аналитически описанной линии тренда с высоким коэффициентом детерминации не является достаточным условием для построения оптимальной прогностической модели. Рост коэффициента детерминации уменьшает лишь локальную ошибку тренда, но не снижает ошибки модели в целом, например в нашем случае в энергопотреблении всегда присутствуют случайные скачки, принимаемые за закономерность [5].

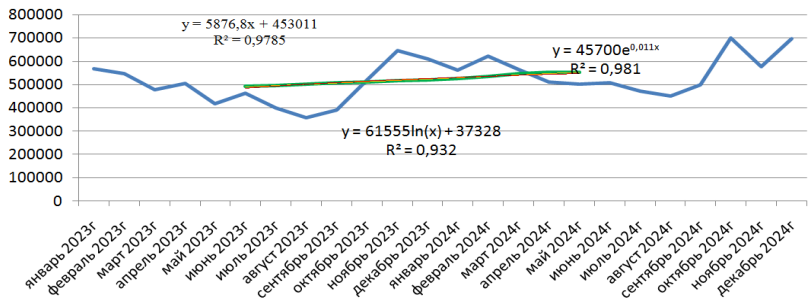


Рисунок 2 – Линии тренда и фактическое потребление электроэнергии за 2 года (2023 и 2024 гг.)

На рисунке 2 представлен графический анализ, который показывает, что при использовании различных функций регрессии (Красным цвет показан логарифмический тренд, черным цветом – линейный, желтым – экспоненциальный) присутствует неопределенность прогноза.

Логарифмическая модель дает заниженные оценки, экспоненциальная показывает завышенный прогнозный показатель. Описание динамики тренда, описанная линейным уравнением регрессии

$$y = 5876{,}8x + 453011$$

с показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0{,}9785$ наиболее точно описывает динамику энергопотребления. Это позволяет использовать линейное уравнение в качестве базы для построения краткосрочного прогнозирования. Коэффициент регрессии показывает, что в среднем ежемесячное потребление электроэнергии увеличивается на 5876,8 кВт·ч. Положительная динамика тренда может быть связана с расширением производственных мощностей. Значение R^2 близкое к единице свидетельствует об адекватности математической модели, и наиболее точно описывают данные, приведенные на рисунке 1.

Для выявления долгосрочного тренда применяется метод аналитического сглаживания текущих колебаний и расчет скользящей средней для каждого интервала [6]. Учитывая, помесячные исходные данные и наличие выраженной сезонной цикличности период расчета скользящей средней будет равна с периодом равной двенадцати месяцам, что соответствует полному годовому циклу:

$$\bar{Y}_{ср} = \frac{Y_{i-1} + Y_{i-2} + \cdots + Y_{i-n}}{n} \tag{2}$$

Здесь:

n – период сглаживания, определяемый цикличностью временного ряда.

В процессе математического моделирования [7; 8; 9] возникает необходимость оценки существующих колебательных процессов, поэтому для анализа сезонной компоненты в рамках мультипликативной модели вычисляется центрированная скользящая средняя:

$$\bar{Y}_{цсс} = \frac{\bar{Y}_{i-1} + \bar{Y}_{i-2} + \cdots + \bar{Y}_{i-n}}{n} \tag{3}$$

Оценка сезонной компоненты определяется как частное от деления фактических значений временного ряда на сглаженные значения центрированной скользящей средней:

$$S = \frac{Y}{\bar{Y}_{цсс}} \tag{4}$$

Результаты и обсуждение

Мультипликативная модель временного ряда была построена на основе данных, представленных на рисунке 1, полученных от электросетевой компании ТОО «Оңтүстік Жарық Транзит» по городу Шымкент. Расчет мультипликативной модели был выполнен в программной среде Excel с применением встроенных функций регрессионного анализа. Результаты расчета представлены на рисунке 3.

t	год	Месяц	Y	$\bar{Y}_{ср}$	$\bar{Y}_{цсс}$	T	y/T=S*E	S	Sск	Ŷ	E
1	2023	январь	566997			458887,8	1,23559	1,145473	1,152334	528791,8	1,072
2		февраль	546077			464764,6	1,174954	1,168972	1,175974	546550,9	0,999
3		март	477145			470641,4	1,013819	1,029427	1,035592	487392,5	0,979
4		апрель	505047			476518,2	1,059869	0,994038	0,999992	476514,3	1,060
5		май	418637			482395	0,86783	0,886776	0,892087	430338,3	0,973
6		июнь	463984	492039,5	491839,4167	488271,8	0,950258	0,92869	0,934252	456168,8	1,017
7		июль	400169	491639,3	494825,6667	494148,6	0,809815	0,823538	0,828471	409387,7	0,977
8		август	358346	498012	501700,2917	500025,4	0,716656	0,752107	0,756612	378325,2	0,947
9		сентябрь	392218	505388,6	505595,0833	505902,2	0,775284	0,820373	0,825286	417514,2	0,939
10		октябрь	519544	505801,6	509234,0833	511779	1,015173	1,104669	1,111286	568732,7	0,914
11		ноябрь	645082	512666,6	514465,875	517655,8	1,24616	1,104627	1,111243	575241,5	1,121
12		декабрь	611228	516265,2	519295,9583	523532,6	1,167507	1,169865	1,176872	616130,8	0,992
13	2024	январь	562195	522326,8	526159,8333	529409,4	1,061929			610056,2	0,922
14		февраль	622549	529992,9	534499,8333	535286,2	1,163021			629482,4	0,989
15		март	565664	539006,8	546524	541163	1,045275			560424,2	1,009
16		апрель	510003	554041,3	551159,7083	547039,8	0,932296			547035,3	0,932
17		май	501017	548278,2	551825,625	552916,6	0,906135			493249,7	1,016
18		июнь	507167	555373,1		558793,4	0,907611			522053,7	0,971
19		июль	472908			564670,2	0,837494			467812,8	1,011
20		август	450340			570547	0,789313			431682,7	1,043
21		сентябрь	500384			576423,8	0,868084			475714,7	1,052
22		октябрь	699958			582300,6	1,202056			647102,3	1,082
23		ноябрь	575925			588177,4	0,979169			653608,2	0,881
24		декабрь	696367			594054,2	1,172228			699125,7	0,996

Рисунок 3 – Результаты расчета мультипликативной модели

Определим коэффициент детерминации мультипликативной модели

$$R^2 = 1 - \frac{\sum E^2}{\sum (Y - S_{\text{ск}} \cdot T)^2} \quad (5)$$

Коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,85$ и указывает на то, что построенная мультипликативная модель объясняет 85 % вариацию уровней временного ряда энергопотребления.

В мультипликативной модели обязательным условием проверки является условие равенства суммы сезонных индексов количеству периодов в году:

$$\sum_i^n S_{\text{ск}} = 12 \quad (6)$$

Расчет обязательного условия приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Проверка обязательного условия мультипликативной модели

Сезонный индекс	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Итого
$S_{\text{ск}}$	1,15233	1,17597	1,03559	0,99999	0,89209	0,93425	0,82847	0,75661	0,82529	1,11129	1,11124	1,17687	12

Проверим адекватность мультипликативной модели по критерию Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-k-1}{k} \quad (7)$$

Для построенной мультипликативной модели значение критерия меньше стандартного значения 0,05 (0,005562012<0,05), что говорит о значимости модели. Для оценки качества и статистической значимости был использован дисперсионный анализ [7; 8; 9], приведенный на рисунке 4.

ВЫВОД ИТОГОВ								
Регрессионная статистика								
Множест	0,86807							
R-квадра	0,75354							
Нормиро	0,70165							
Стандарт	49369,7							
Наблюде	24							
Дисперсионный анализ								
	df	*SS*	*MS*	*F*	*значимость F*			
Регрессия	4	1,41589E+11	35397265719	14,5227	1,4E-05			
Остаток	19	46310028525	2437369922					
Итого	23	1,87899E+11						
	Коэффициен	*Стандартная ошиб*	*t-статистика*	*Значени*	*нижние 95%*	*верхние 95%*	*нижние 95,0%*	*верхние 95,0%*
Y-пересеч	463721	34430,67745	13,46824145	3,6E-11	391656	535785	391656	535785
t	2679,01	6272,456035	0,427107467	0,6741	-10449	15807,4	-10449	15807,4
t2	129,786	242,7613876	0,534623319	0,59911	-378,32	637,891	-378,32	637,891
sin	43476,7	15456,45696	2,812853349	0,01111	11126	75827,5	11126	75827,5
cos	84053,8	14732,86797	5,705187633	1,7E-05	53217,5	114890	53217,5	114890

ВЫВОД ОСТАТКА		
Наблюдение	*Энергог*	*Остатки*
1	561061	5936,445253
2	549277	-3199,701663
3	516403	-39257,53547
4	472138	32908,6181
5	429306	-10669,05666
6	400413	63570,72972
7	394302	5866,802869
8	413780	-55434,22201
9	454868	-62649,70359
10	507864	11679,68386
11	559948	85133,75604
12	598612	12616,22348
13	615013	-52817,73943
14	606344	16205,25208
15	576584	-10920,44329
16	535435	-25432,15129
17	495718	5299,312371
18	469940	37227,23719
19	466944	5964,448762
20	489536	-39196,43769
21	533739	-33354,78084
22	589850	110107,745
23	645049	-69124,04435
24	686827	9539,561522

Рисунок 4 – Результаты расчета дисперсионного анализа

Для сравнения данных модельных и исходных был построен график прогноза потребления электроэнергии, приведенный на рисунке 5. На рисунке приведены Y(t) – фактические данные потребления электроэнергии основных объектов города Шымкент за период 2023–2024 гг.; Ŷ – расчетные значения; T – линия тренда; Y_p – прогноз потребления электроэнергии с учетом сезонн на 6 месяцев.

Таким образом, линейная мультипликативная модель описывает 85% изменений в потреблении электроэнергии в зависимости от временного ряда, что подтверждает высокую точность прогноза. Предложенная модель расчета энергопотребления позволяет использовать такой подход для оптимального распределения энергетических мощностей с учетом сезонных колебаний [10; 11].

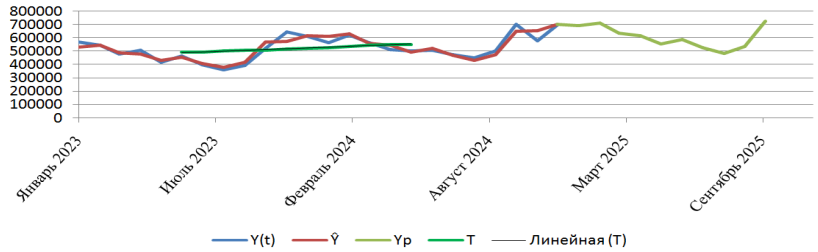


Рисунок 5 – Анализ и прогноз потребления электроэнергии с учетом сезонной компоненты мультипликативной модели

Выводы

На основе эконометрического анализа была разработана мультипликативная прогнозная модель временного ряда энергопотребления основных объектов города Шымкент. Мультипликативная модель показывает на устойчивый рост нагрузки. Тренд имеет положительный наклон, даже без учета сезонных пиков уровень потребления нагрузки постоянно растет, что говорит об увеличении населения и росте города. Модель показывает, что существующая система имеет жесткую циклическую зависимость, так как внешние факторы доминируют над случайными факторами. Полученная мультипликативная модель объясняет 85 % изменений в потреблении электроэнергии в зависимости от временного ряда.

Если сравнить прогнозную линию с данными, полученными от электросетевой компании города Шымкент, то можно увидеть, что траектории практически повторяются. Это говорит о том, что выбранная математическая модель адекватно описывает исследуемый объект и может применяться для краткосрочного планирования ресурсов.

Социальные объекты и жилой фонд требуют от города маневренных мощностей, которые были бы способны покрывать кратковременные, но мощные пики. В перспективном плане развития города необходимо закладывать привлечение дополнительных мощностей с учетом коэффициента

одновременности и расширения инфраструктуры, а также создание интеллектуальной системы распределения электроэнергии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Афифи, А.** Статистический анализ : Подход с использованием ЭВМ [Текст]. – М. : Мир, 1982. – 488 с.

2 **Бокс, Дж.** Анализ временных рядов. Прогноз и управление [Текст]. – М. : Мир, 1976. – 406 с.

3 **Бекларян, Л. А.** Методы социально-экономического прогнозирования: учебник для вузов [Текст]. – Алматы : Эконометрика, 2015. – 320 с.

4 **Hyndman, R. J.** Forecasting: Principles and Practice [Текст]. – Melburne, 2021. – 518р.

5 **Григорьев, В. Ю.** Моделирование нагрузки электропотребления городских рапсределительных сетей на основе гармонического анализа [Текст] // Энергетика и автоматизация. – 2023. – №3. – С. 112–125.

6 **Иванова, С. А.** Оценка значимости регрессионных моделей в задачах долгосрочного планирования инфраструктуры // Экономика региона. – 2024. – Т.20, №1. – С. 210–233.

7 **Галочкин, В. Т.** Эконометрика : учебник и практикум для вузов [Текст]. – М. : Издательство Юрайт, 2024. – 293 с.

8 **Box, G. E. P.** Time Series Analysis: Forecasting and Control [Текст]. – Hoboken : Wiley, 2015. – 712 p.

9 **Дрейпер, Н.** Прикладной регрессионный анализ [Текст]. – 3-е изд. – М. : Вильямс, 2016. – 912 с.

10 **Айвазян, С. А.** Методы эконометрики : учебник [Текст]. – М. : ИНФРА-М., 2019. – 512 с.

11 **Стонженко, И. В.** Дисперсионный анализ как инструмент оценки устойчивости функционирования электроэнергетических систем [Текст]// Электричество. – 2021. – №8. – С. 12–19.

REFERENCES

1 **Afifi, A.** Statisticheski analiz: Podhod s ispolzovaniem EVM [Statistical analysis : A Computer Oriented Approach] [Text]. – M. : Mir, 1982. – 488 p.

2 **Boks, Dzh.** Analiz vremennyh ryadov. Prognoz i upravlenie [Time series analysis. Forecasting and control] [Text]. – M. : Mir, 1976. – 406 p.

3 **Beklaryan, L. A.** Metody sotsialno-ekonomicheskogo prognozirovaniya: uchebnik dlya vuzov [Methods of socio-economic forecasting: textbook for universities] [Text]. – Almaty : Ekonomika, 2015. – 320 p.

4 **Hyndman, R. J.** Forecasting : Principles and Practice [Text]. – Melburne, 2021. – 518 p.

5 **Grigoryev, V. Yu.** Modelirovanie nagruzki elektropotrebleniya gorodskikh setey na osnove garmonicheskogo analiza [Modeling of electricity consumption load in urban distribution networks based on harmonic analysis]// Energetika I avtomatizatsiya [Energy and automation]. – 2023. – No. 3. – P.112–125.

6 **Ivanova, S. A.** Otsenka znachimosti regressionnykh modeley v zadachakh dolgosrochnogo planirovaniya infrastruktury [Assessment of the significance of regression models in long-term infrastrukture problems] // Economika regiona [Economy of Region]. – 2024. – Vol. 20, No.1. – P. 210–233.

7 **Galochkin, V. T.** Ekonometrika: uchebnik I praktikum dlya vuzov [Econometrics: Textbook and Workshop for Universities] [Text]. – Moscow : Yurayt Publishing House, 2024. – 293 p.

8 **Box, G. E. P.** Time Series Analysis : Forecasting and Control [Текст]. – Hoboken : Wiley, 2015. – 712 p.

9 **Draper, N. R.** Prikladnoi regressionyi analis [Applied Regression Analysis] [Text]. – 3rd ed. – Moscow : Wilyams, 2016. – 912 p.

10 **Ayvazyan, S. A.** Metody ekonometriki: uchebnik [Methods of Economtrics : Textbook] [Text]. – Moscow : INFRA-M, 2019. – 512 p.

11 **Stonozhenko, I. V.** Dispersionnyy analiz kak inctrument otsenki ustoychivosti funktsionirovaniya elektroenergeticheskikh sistem [Analysis of variance as a tool for assessing the stability of electric power systems functioning] // Elektrichestvo [Electricity]. – 2021. – No.8. – P. 12–19.

Поступило в редакцию 01.04.26.
Поступило с исправлениями 23.04.26.
Принято в печать 31.08.26.

**А. Т. Апсеметова[1], Ж. С. Шыныбай[2],*
К. Е. Арыстанбаев[3], Р. М. Чимкентбаева[4]
[1,4]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
Қазақстан Республикасы, Шымкент қ.;
[2]Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[3]АҚ Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы,
Қазақстан Республикасы, Шымкент қ.

01.04.26 ж. баспаға түсті.
23.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚАЛАЛЫҚ ТАРАТУ ЖЕЛЛЕРІНДЕГІ ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫН ТҰТЫНУДЫ ТАЛДАУ ЖӘНЕ БОЛЖАУ ҮШІН СЫЗЫҚТЫ МУЛЬТИПЛИКАТИВТІ МОДЕЛЬДІ ҚОЛДАНУ

Шымкент мегаполисінің әлеуметтік маңызы бар нысандарыныңэлектр энергия тұтынуын болжау нәтижелері ұсынылған. Мегаполис өзгерістерінің ерекшелігі – жыл бойындағы энергия тұтынудың маусымдық ауытқулары қалалық қуаттарды бөлуді оңтайландыруға қабілетті басқарудың адаптивті модельдеріне көшуді талап етеді. Электр энергиясын басқару процессінде тиімділікті арттыру әдістерінің бірі болжау болып табылады. Дегенмен, нәтижелердің дәлдігін қамтамасыз ету үшін детальді талдау қажет. Жыл бойындағы электр энергиясының ай сайынғы жүктемесі туралы ақпаратты есепке алып қалалық ортаның энергия тұтынуын болжауға, сонымен бірге жүйелік деңгейде басқаруға мүмкіндік береді.

Электр энергияны тұтынуға әсер ететін негізгі фактор – маусымдылық, ол тұтынудын дамуын анықтайды. Сондықтан қолданыстағы әдістерді бейімдеу және болжаудың жаңа әдістерін өңдеу зерттеудің өзекті бағыты болып табылады.

Жұмыстын мақсаты – мультипликативті модельдеу құралдарымен қалалық инфрақұрылым нысандарының энергия тұтынуын талдау және болжау. Шымкент қаласының негізгі нысандарының 2023–2024 жж электр энергиясын тұтынуының нақты мәліметтері негізінде сызықтық тренд моделін қолдану арқылы талдау жүргізілді. Фишер критерийі мен детерминация коэффициентін пайдалана отырып модельдің адекваттылығына тексеру жүргізілді. Энергия тұтынудың өсу тенденциясын сипаттау үшін маусымдылыққа мультипликативті коррекциясы бар сызықтық тренд ең тиімді болып табылатыны анықталды.

Кілтті сөздер: мультипликативті модель, болжау, электр энергиясын тұтыну, модельдеу, регрессиялық талдау.

**A. Apsemetova[1], Zh. Shynybay[2], K. E. Arystanbayev[3], R. Chimkentbaeva[4]*
[1,4]M. Auezov South Kazakhstan University,
Republic of Kazakhstan, Shymkent;
[2]K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[3]South Kazakhstan Medical Academy,
Republic of Kazakhstan, Shymkent.
Received 01.04.26.
Received in revised form 23.04.26.
Accepted for publication 31.08.26.

APPLICATION OF A LINEAR MULTIPLICATIVE MODEL FOR ANALYSIS AND FORECASTING OF ELECTRICITY CONSUMPTION IN URBAN DISTRIBUTION NETWORKS

This paper presents the results of electricity consumption forecasting for socially significant facilities in the Shymkent megacity. The specific nature of the megacity's evolution – marked by seasonal fluctuations in energy demand throughtout the year – necessitates a transition toward adaptive management models capable of optimizing urban capacity distribution. While forecasting is a key method for improving energy management efficiency, detayled analysis is required to ensure accurate results. Accounting for monthly load data throuhout the year enables the forecasting of urban energy consumption, providing the foundation for system-level management.

Seasonality, the primary factor influencing energy consumption, defines the consumption trend. Consequently, adapting existing methods and developing new forecasting techniques is a highly relevant research area. This study aims to analyze and forecast the energy conumption of urban infrastructure facilities using multiplicative modeling tools. Based on actual electricity consumption data from key facilities in Shymkent for 2023–2024, an analysis was conducted using a linear trend model. The model's adequacy was verified using the Fisher criterion and the coefficient determination. The study determined that a linear trend with multiplicative seasonal correction is the most effective approach for describing growth trends in energy consumption.

Keywords: multiplicative model, forecasting, electricity consumption, modeling, regression analysis.

МРНТИ 44.39.29

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/72-90

***А. А. Арпиш[1], С. А. Минажова[2]**

[1]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;

[2]QazNRG Group, Республика Казахстан, г. Алматы.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3368-6081

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5461-2251

*e-mail: aibar201329@gmail.com

АНАЛИЗ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ МИНИМИЗАЦИИ ОБЛЕДЕНЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В данной статье проведен анализ современных комбинированных методов минимизации обледенения ветроэнергетических установок. Обобщены результаты, полученные различными авторами в ходе исследований комбинированных методов. Освещены основные проблемы, возникающие при обледенении ветроэнергетических установок, включая потери и снижение выработки электроэнергии. Показано, что комбинированные методы являются перспективным решением для повышения эффективности минимизации обледенения за счёт синергетического эффекта.

В целом анализ показал, что комбинированные методы на основе сочетания функциональных покрытий и теплового воздействия получили широкое распространение. Установлено, что данное сочетание позволяет существенно снизить энергопотребление сохраняя высокую эффективность как противообледенения, так и удаления льда. Кроме того, определено, что комбинированные методы на основе сочетания механических или акустических воздействий, обладают значительным потенциалом снижения энергопотребления при удалении льда, превышающих показатели других рассмотренных комбинаций, однако требуют дальнейших экспериментальных подтверждений.

В результате проведенного анализа была предложена иерархическая классификация комбинированных методов минимизации обледенения ветроэнергетических установок, которая учитывает тип физического воздействия на лёд, а также способы реализации и конструктивные доработки систем. Кроме того, проведен качественный сравнительный анализ рассмотренных методов. Полученные результаты могут быть применены для выбора и обоснования комбинированных методов минимизации обледенения ветроэнергетических установок, а также способствовать повышению надёжности их эксплуатации.

Ключевые слова: Ветроэнергетические установки, обледенение, комбинированные методы, синергетический эффект, противообледенение, удаление льда, энергопотребление, эффективность.

Введение

В последние годы в связи с глобальным переходом к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) наблюдается активное развитие ветроэнергетики. По данным отчета World Wind Energy Association (WWEA) общий глобальный объем ветроэнергетики в 2025 году составил 1,346 ТВт, что покрывает приблизительно 11 % мирового спроса. За последний год было введено в эксплуатацию 169 ГВт, что на 35 % больше, чем показатели 2024 года. В результате годовой темп роста увеличился с 11,9 % до 14,3 %. Основным драйвером такого роста является Китай (130 ГВт), Индия (6,3 ГВт), США (6,27 ГВт), Германия (4,6 ГВт) [1].

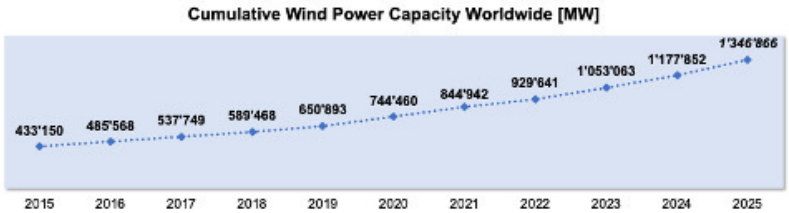


Рисунок 1 – Общая установленная мощность ветроэнергетики в мире на конец 2025 года [1]

Согласно данным Qazaq Green в Казахстане ветроэнергетика занимает первое место по установленной мощности среди объектов ВИЭ и достигла 1,9 ГВт в 2025 году [2]. Кроме того, в 2026 году планируется запуск двух ветроэлектростанций в Костанайской области на 150 МВт [3].

Вместе с тем эксплуатация ветроэнергетических установок (ВЭУ) в условиях холодного климата осложняется обледенением ВЭУ. Обледенение ВЭУ – это процесс образования и накопления льда на элементах ветроустановки при отрицательных температурах и большой влажности. Оно приводит к ухудшению аэродинамики, экстремальным и усталостным нагрузкам ротора и фундамента ВЭУ, чрезмерным вибрациям, вызывая простой, увеличение уровня шума, риску сброса льда, снижению производительности и потерям энергии [4, с. 44–45]. Потери энергии ВЭУ из-за обледенения могут достигать до 20 % от их годового объема выработки электроэнергии, а в отдельные дни во время сильного обледенения до 80 % [5; 6].

В связи с этим разработка и внедрение эффективных методов минимизации обледенения ВЭУ является одной из важных задач ветроэнергетики. На сегодняшний день существуют различные методы минимизации обледенения, которые традиционно делятся на пассивные и активные. А по режиму работы на системы предотвращения обледенения и системы удаления льда. Пассивные методы, такие как супергидрофобные покрытия не потребляют электроэнергии и относятся к системам предотвращения обледенения, которые противодействуют образованию льда. Такие покрытия снижают адгезию водяных капель к поверхности лопасти, а также способствуют задержке образования льда. Активные методы, такие как электрические системы нагрева, системы подачи горячего воздуха, микроволновые, вибрационные и ультразвуковые системы работают за счет потребления электроэнергии и преимущественно относятся к системам удаления льда, которые удаляют уже образовавшийся слой льда. Кроме некоторых тепловых методов, таких как электронагрев, которые способны работать как в режиме предотвращения обледенения, так и удаления льда. Однако каждый из этих методов имеет свои ограничения: пассивные методы не всегда эффективно предотвращают образование льда и не обеспечивают его удаление, а также некоторые из них могут быть токсичными и приводить к коррозии. В свою очередь, активные методы характеризуются дополнительным энергопотреблением, величина которого зависит от метода и условий обледенения [4, с. 257–273].

Таким образом в последние годы активно развиваются комбинированные методы, объединяющие преимущества различных подходов. Однако в настоящее время наблюдается недостаток комплексных исследований, направленных на систематизацию и сравнительный анализ комбинированных методов.

Целью данной работы является анализ и сравнение современных комбинированных методов минимизации обледенения ветроэнергетических установок, а также классификация и выявление основных направлений развития.

Материалы и методы

Для сбора релевантных, репрезентативных исследовательских статей был проведен поиск с использованием поисковой системы Google Scholar и научной базы данных ScienceDirect. Для поиска был выбран широкий набор ключевых слов, такие как «wind turbine», «wind turbine icing», «anti-icing», «de-icing», «combined», «synergy», «hybrid», «wind turbine anti-icing methods», «wind turbine de-icing methods», которые были использованы в разных комбинациях с применением логических операторов «AND», «OR», и кавычек для уточнения поисковых запросов.

Научные статьи для данного анализа выбирались по следующим критериям:

– Опубликованные на английском языке за последние 10 лет в период с 2016 по 2026 годы;
– Описывающие использование комбинированных методов;
– Наличие описания методики исследования и экспериментальной части;
– Наличие количественных показателей результатов исследований;
– Применимые к ветроэнергетическим установкам.

Были исключены работы:

– Без экспериментального подтверждения;
– С недостаточным описанием методики и условий эксперимента.

В отличие от систематических обзоров, данное исследование ориентировано на качественную систематизацию и сравнительный анализ комбинированных методов с выявлением ключевых тенденций их развития.

Для проведения сравнительного анализа комбинированных методов минимизации обледенения ВЭУ использовался качественный подход, основанный на сопоставлении результатов, представленных в отобранных исследованиях. Сравнение проводилось по следующим критериям: энергопотребление, эффективность предотвращения обледенения и удаления льда, работа в разных климатических условиях, наличие синергетического эффекта, ограничения, стоимость, конструктивная сложность и перспективы развития. Данные критерии были выбраны поскольку отражают основные эксплуатационные характеристики и особенности систем защиты от обледенения.

Количественное сравнение не проводилось в связи с различием условий экспериментов отобранных исследований, в частности климатических условий, методик испытаний и испытуемых объектов. В связи с этим полученные характеристики были обобщены и представлены в виде качественной сравнительной оценки.

Результаты и обсуждения

Проведённый анализ литературы позволил выделить несколько направлений исследований, различающихся по типу физического воздействия на процесс обледенения. Основное направление представлено значительным количеством исследований, рассматривающих комбинированные методы на основе сочетания функциональных покрытий и тепловых воздействий. Альтернативное направление рассматривает комбинированные методы на основе механических и акустических воздействий, в сочетании с другими способами воздействия. Данное направление представлено ограниченным количеством исследований.

Анализ работ [7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15] показывает, что комбинация функциональных покрытий с тепловыми воздействиями обеспечивает высокую эффективность при снижении энергопотребления. При этом эффективность таких комбинированных методов зависит не только от мощности нагрева, но и от способа реализации и оптимального распределения функций между покрытием и тепловым воздействием. В рамках данного направления были выделены три типа комбинированных методов, различающихся по способу реализации теплового воздействия.

В работах [7; 8; 9] показан первый тип, который реализуется совмещением функциональных покрытий и электронагрева. Авторы работ [7; 8] рассматривают использование полного супергидрофобного покрытия лопасти в сочетании с частичным электронагревом передней кромки. Показано, что такая комбинация может снизить энергопотребление до 90 % в сравнении с нагревом всей поверхности гидрофильной лопасти [7]. Эффективность метода обусловлена тем, что частичный нагрев предотвращает образование льда на передней кромке, а супергидрофобное покрытие снижает адгезию водяных капель к поверхности, препятствуя вторичному обледенению.

Кроме того, интеграция супергидрофобного покрытия и электронагрева в поверхностный слой композита лопасти, как показано в работе [8], может снижать тепловые потери, повышать устойчивость покрытия и уменьшать энергопотребление на 26 % по сравнению с использованием только электронагрева. Также отмечается наличие синергетического эффекта, проявляющегося значительным увеличением времени замерзания капель при наличии небольшого нагрева по сравнению с супергидрофобным покрытием без нагрева.

Однако на основе анализа можно сделать вывод, что при сильном уменьшении нагреваемой области, эффективность рассмотренных методов

в режиме удаления льда может снижаться, что ограничивает их применение в условиях интенсивного обледенения.

В отличие от этого, в работе [9] авторы рассматривают использование фазо-переходных покрытий PCMS-C14 в сочетании с частичным электронагревом. Эффективность метода обусловлена свойствами материала покрытия, который улучшает электронагрев, выделяя скрытое тепло при фазовом переходе. Кроме того, покрытие изолирует и равномерно распределяет тепло, предотвращая возникновение локальных перегревов. В результате достигается снижение энергопотребления на 12,89–19,23 % и сокращение времени удаления льда на 25–68 с в разных климатических условиях по сравнению с одиночным электронагревом. Несмотря на то что данное сочетание в отличие от комбинации с супергидрофобными покрытиями, значительно ускоряет нагрев, оно ограничено температурным диапазоном работы (приблизительно от 7°C до –17°C) и большей стоимостью. Кроме того, данное покрытие нуждается в дальнейшей проверке долговечности и устойчивости к внешним факторам.

В работе [10] показана реализация второго типа, основанного на совмещении супергидрофобного покрытия и теплового воздействия от фототермического нагрева. Такая реализация метода не требует внешнего энергопотребления, как в работах [7; 8; 9], поскольку тепловое воздействие обеспечивается за счет преобразования солнечного излучения. Авторы отмечают 50 % эффективность преобразования и возможность быстрого нагрева поверхности за счет фототермии, а также возможность работы как в режиме предотвращения обледенения, так и удаления льда. Однако применение данного типа метода ограничено погодными условиями, временем солнечной активности и углом падения солнечного излучения.

В работах [11; 12; 13; 14; 15] рассматривается третий тип, в котором тепловое воздействие реализуется комбинированием электронагрева с фототермическим нагревом на основе многофункциональных супергидрофобных покрытий. В отличие от рассмотренных двух типов, этот обеспечивает возможность работы как в пассивном режиме за счет фототермического нагрева, так и в активном режиме за счет электронагрева.

Результаты работы [11] показывают уменьшение времени удаления льда с 76,8 до 42,4 с, увеличение времени замерзания капель до 174 с и сокращение энергопотребления на 26% в сравнении с покрытием без супергидрофобных свойств. Более высокая эффективность такого типа методов обусловлена наличием синергетического эффекта. Данный эффект наблюдается при совместном использовании электро/фототермического

нагрева, проявляющегося большим повышением температуры поверхности по сравнению с их раздельным применением.

Дальнейшее развитие данного типа показано в работах [12; 13; 14; 15], где основной фокус смещается на оптимизацию конструкции, энергопотребления и удешевление стоимости производства. В частности, в работе [12] рассматривается использование чернил каракатицы в качестве более дешевого фототермического материала, что позволило снизить стоимость производства многофункционального покрытия, сохранив при этом высокую эффективность. В результатах исследования отмечается сокращение времени плавления льда и снижение энергопотребления на 41,73 % по сравнению с поверхностью исключительно с электрическим нагревом.

В работе [13] установлено, что использование теплоизоляционных и теплораспределяющих слоев позволяет реализовать конструктивную оптимизацию тепловых потоков. В результате наблюдается уменьшение теплопотерь и более эффективное распределение теплового потока. Отмечается повышение эффективности работы многофункционального покрытия в условиях неравномерного потока солнечного излучения. В частности, замечено приблизительно 10-кратное уменьшение разности температур между образцами с теплоизоляционным слоем и без него в условиях, когда часть подложки была затенена от попадания светового потока. Также отмечается увеличение температуры подложки с теплоизоляционным слоем приблизительно в 1,5 раза больше по сравнению с образцом без него. В целом данная реализация функционально схожа с методом, описанным в работе [9].

В свою очередь, в работе [14] реализовано применение импульсного электронагрева для оптимизации энергопотребления, который позволяет сократить энергозатраты на 13,8–65,5 % по сравнению с постоянным режимом работы электронагрева.

Одним из актуальных направлений развития является интеллектуализация работы систем. В работе [15] реализовывается внедрение трибоэлектрических наногенераторов (TENG), которые преобразуют механическое воздействие в электрический сигнал за счет трибоэлектрического эффекта. Отмечается способность автономной работы, обнаружения и измерения толщины льда в реальном времени, а также определения состояния поверхности. На основе анализа работы можно сделать вывод, что, используя трибоэлектрические наногенераторы, можно реализовать адаптивную интеллектуальную систему управления. Такая система способна автоматически включать электронагрев при обнаружении льда, а также регулировать мощность нагрева в зависимости от толщины льда и состояния поверхности, тем самым

значительно сокращая энергопотребление. Однако в работе установлено, что чувствительность трибоэлектрических наногенераторов зависит от толщины льда. Это может приводить к снижению точности определения толщины льда при слое более 8 мм, вследствие нарушения однозначной зависимости между толщиной льда и электрическим сигналом, что требует корректной настройки системы.

Таким образом, третий тип реализации показывает более стабильную работу, всепогодную эффективность и в отличие от второго типа не зависит от солнечной активности. Однако характеризуется более сложной конструкцией и потенциально высокой стоимостью реализаций.

В целом комбинированные методы, основанные на сочетании функциональных покрытий и тепловых воздействий характеризуются высокой эффективностью и технологической проработанностью. Однако они по-прежнему требуют дальнейшей оптимизации энергопотребления и тепловых потоков.

В связи с этим некоторые исследователи рассматривают другую комбинацию методов, основанную на механическом и акустическом воздействии [16; 17; 18; 19]. В данной работе такие исследования были объединены в отдельное направление, обозначенное альтернативным, в связи с ограниченным количеством исследований в данной области.

В работе [16] авторы рассматривают комбинированный метод, основанный на совмещении ультразвука и электронагрева. Эффективность метода обусловлена тем, что электронагрев, оттапливая лёд, способствует возникновению водяной плёнки на границе лёд-поверхность, которая снижает адгезию льда. В свою очередь ультразвук генерирует сдвиговые напряжения, приводящие к разрушению и отслоению слоя льда. Установлено, что водяная пленка компенсирует недостаток сдвиговых напряжений и ускоряет время удаления льда на 59 % в сравнении с одиночным применением электронагрева. Также отмечается повышение эффективности работы системы по сравнению с раздельным применением электронагрева и ультразвука. При этом, совместное применение двух активных методов повышает энергопотребление по сравнению с одиночным применением ультразвука и снижает по сравнению с одиночным применением электронагрева.

В сравнении с методом, представленным в работе [16] авторы в работе [17] рассматривают совместное применение ультразвука и супергидрофобного покрытия. Принцип работы данного метода схож с описанным в работе [16], однако здесь снижение адгезии льда осуществляется за счет супергидрофобных свойств покрытия. Показано, что эффективность удаления льда возрастает

до 95 % в сравнении с поверхностью без покрытия при ультразвуковом воздействии, а энергопотребление значительно ниже, чем у метода, описанного в работе [16]. Однако возможна неравномерность распределения напряжений, которая может привести к неполному удалению льда.

В работе [18] комбинация реализована сочетанием ультразвука с низкочастотными вибрациями. В данном исследовании низкочастотное резонансное возбуждение используется для создания дополнительных сдвиговых напряжений. Как и в работах [16; 17] совместное применение низкочастотных колебаний компенсирует недостаточное воздействие ультразвука и повышает эффективность удаления льда. Однако эффективность данного метода зависит от точного подбора частоты и мощности возбуждения, что усложняет практическую реализацию. Кроме того, данный метод способен работать только в режиме удаления льда.

В работе [19] показано совместное использование акустических волн и гидрофобных покрытий. В сравнении с методом, описанным в работе [18] данный подход одновременно может выполнять функции предотвращения обледенения, удаления льда, а также мониторинга состояния поверхности. Эффективность метода обусловлена синергетическим эффектом, при котором гидрофобное покрытие снижает адгезию льда, облегчая его удаление, при этом не ухудшая распространение акустических волн в подложке. Однако данный метод чувствителен к климатическим условиям. В связи с этим требуется постоянное изменение резонансной частоты и подачи энергии, что усложняет работу системы.

В целом комбинированные методы альтернативного направления показывают высокую эффективность удаления льда за счет реализации синергетического эффекта разными механизмами. Кроме того, они обладают большим потенциалом снижения энергопотребления, однако в настоящее время уступают методам основного направления по стабильности работы и степени проработанности, что ограничивает его широкое практическое применение.

Следует отметить, что несмотря на значительное повышение долговечности функциональных покрытий, они остаются подверженными к циклической деградации, что со временем может уменьшить эффективность комбинированных методов, где они применяются.

По результатам анализа представленных работ был проведен качественный сравнительный анализ комбинированных методов, результаты которого представлены в таблицах 1–2.

Характеристики одиночных методов в таблицах 1–2 приведены в обобщенном виде на основе анализа литературы и используются в качестве эталона для сравнения с комбинированными методами.

Таблица 1 – Качественный сравнительный анализ по основному направлению исследований

Критерий	**Супергидро-фобное покрытие**	**Электро-нагрев**	**Тип 1 Покрытие+ электро-нагрев**	**Тип 2 Покрытие+ фототермия**	**Тип 3 Покрытие+ электронаг-рев+ фототермия**
Энергопот-ребление	Отсутствует	Высокое	Среднее	Отсутствует внешнее энерго-потреб-ление	Низкое-среднее
Эффектив-ность предотвраще-ния обледенения	Среднее	Высокое	Высокое	Высокое при наличии солнца Среднее без солнца	Очень высокое
Эффектив-ность удаления льда	Не удаляет лед	Высокое	Высокое	Высокая при наличии солнца Не удаляет лед без солнца	Очень высокое
Работа в разных климати-ческих условиях	Ограни-ченная	Стабильная	Стабильная	Ограничена солнечной активностью	Всепогодно стабильная
Синерге-тический эффект	Отсутствует	Отсутствует	Есть	Есть, но ограничен солнечной активностью	Есть

Ограничения	Цикличная деградация, не удаляет лед, низкая эффективность при интенсивном обледенении	Высокое энергопотребление	Зависимость от зоны нагрева	Зависимость от солнечной активности	Сложность реализации и высокая стоимость
Стоимость	Низкая-средняя	Средняя	Средняя-высокая	Средняя	Высокая -очень высокая
Конструктивная сложность	Низкая	Средняя	Средняя	Низкая	Высокая
Перспективы развития	Средние (повышение устойчивости)	Средние (снижение энергопотребления)	Высокие (оптимизация нагрева и энергопотребления)	Средние (повышение устойчивости и снижение стоимости)	Высокие (интеллекту-альные системы и оптимизация)

Анализ, представленный в таблице 1, показывает, что совместное воздействие нескольких методов значительно повышает эффективность и снижает энергопотребление по сравнению с их одиночным применением. Достигается это из-за синергетического эффекта между функциональным покрытием и тепловым воздействием. Кроме того, комбинированные методы третьего типа данного направления обладают двойным синергетическим эффектом, дополнительно возникающим между фототермическим и электротермическим нагревом, что объясняет их наиболее высокую эффективность в разных погодных условиях. Однако это достигается значительным увеличением стоимости производства и усложнением конструкции, которые могут ограничивать их практическое применение и требуют подтверждения экономической целесообразности.

Таблица 2 – Качественный сравнительный анализ по альтернативному направлению исследований

Критерий	**Ультразвук**	**Ультразвук + Электро-нагрев**	**Ультразвук + супер-гидро-фобные покрытия**	**Ультразвук + низкочас-тотные вибрации**	**Акустические волны + гидрофобные покрытия**
Энерго-потребление	Очень низкое	Среднее-высокое	Очень низкое	Низкое-Среднее	Низкое
Эффектив-ность предотвра-щения обледенения	Низкая	Средняя-высокая	Средняя	Низкая	Средняя
Эффектив-ность удаления льда	Средняя	Высокая	Высокая	Средняя-высокая	Средняя-высокая
Работа в разных климатических условиях	Ограни-ченная	Стабильная	Ограничена деградацией покрытий	Ограничена настройкой частоты	Ограничена настройкой частоты
Синергети-ческий эффект	Отсутствует	Есть	Есть	Есть	Есть
Ограничения	Неравно-мерное удаление льда	Большое энергопот-ребление, стоимость и сложность	Деградация покрытий	Требует точной настройки частот	Зависима от климати-ческих условий
Стоимость	Средняя	Высокая	Средняя-высокая	Средняя-высокая	Средняя-высокая
Конструк-тивная сложность	Средняя	Высокая	Средняя	Высокая	Высокая
Перспективы развития	Средние (оптимиза-ция параметров)	Средние (снижение энергопот-ребления)	Средние (развитие покрытий и оптимизация системы)	Средние (настройка и управление)	Высокие (умные системы и обнаружение)

Анализ, представленный в таблице 2, показывает, что комбинированные методы альтернативного направления характеризуются более низким энергопотреблением в режиме удаления льда по сравнению с методами основного направления. При этом их эффективность такая же высокая.

Однако данные методы характеризуются высокой чувствительностью к настройке параметров системы, что требует точного контроля и оптимизации. Кроме того, они преимущественно ориентированы на удаление льда, и демонстрируют меньшую эффективность противообледенения по сравнению с методами основного направления.

Проведенный анализ работ показывает, что эффективность комбинированных методов зависит не только от комбинации физических воздействий, но и от их различий в реализации и дополнительных функциональных доработках.

В связи с этим на основе анализа литературы была предложена иерархическая классификация комбинированных методов минимизации обледенения ВЭУ, представленная на рисунке 2.

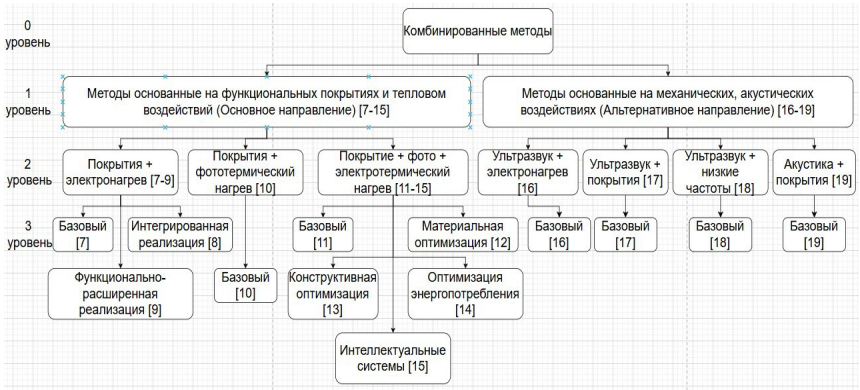


Рисунок 2 – Иерархическая классификация комбинированных методов минимизации обледенения ВЭУ

Предложенная иерархическая классификация состоит из трех уровней систематизации. На первом уровне комбинированные методы разделены по типу физического воздействия на процесс обледенения. На втором уровне, для основного направления разделены по способу реализации теплового воздействия, для альтернативного направления разделены по способу комбинации с другими типами воздействий. При этом различие критериев классификации на этом уровне объясняется разной степенью проработанности двух направлений. На третьем уровне разделены по особенностям дальнейших конструктивных реализаций и функциональных оптимизаций системы.

Следует отметить, что для многофункциональных покрытий с фототермией, а также для всех типов альтернативного направления на третьем уровне рассматриваются лишь базовые реализации. Для методов альтернативного направления это обусловлено ограниченным количеством исследований, представленных в этой области. Для многофункциональных покрытий с фототермией это связано тем, что в данной работе для анализа была выбрана лишь одна репрезентативная работа, представляющая данный тип метода, несмотря на наличие многочисленных исследований. Решение обусловлено тем, что данный тип методов имеет существенное ограничение, связанное с зависимостью от солнечной активности, а его возможные дальнейшие развития частично представлены в рамках третьего типа. Кроме того, показанные на третьем уровне особенности реализации и доработки могут быть реализованы и для других типов комбинированных методов основного направления.

Предложенная классификация может быть уточнена и расширена при включении других баз данных и более широкого подхода к поиску и отбору литературы.

Выводы

В работе проведен анализ, систематизация и качественное сравнение комбинированных методов минимизации обледенения ветроэнергетических установок, на основе которого была разработана иерархическая классификация. Показано, что комбинированные методы обладают высокой эффективностью, обусловленной синергетическим эффектом, а также позволяют уменьшить энергопотребление по сравнению с одиночными методами.

Установлено, что методы основного направления показывают высокую эффективность и практическую применимость, однако требуют дальнейшей оптимизации энергопотребления и повышения устойчивости покрытий. Методы альтернативного направления имеют значительный потенциал снижения энергопотребления при удалении льда, однако менее стабильны и мало изучены.

Определено, что ключевыми ограничениями рассмотренных методов являются деградация покрытий и ограниченность лабораторными условиями. Кроме того, методы рассматривающие многофункциональные покрытия, часто изучаются на плоских подложках, что требует их дополнительной проверки на полноразмерных лопастях ВЭУ.

В целом комбинированные методы являются перспективным направлением, последующее развитие которых связано с оптимизацией и внедрением интеллектуальных систем управления. Полученные в работе

результаты формируют основу для дальнейших исследований в области комбинированных методов минимизации обледенения ВЭУ.

Будущие планы исследований.

Рекомендуется проведение верификации результатов, в условиях приближенных к реальной эксплуатации на динамических моделях ВЭУ. Следует уделить внимание повышению долговечности покрытий, а также дальнейшей оптимизации энергопотребления методов на основе функциональных покрытий с тепловыми воздействиями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 World Wind Energy Association. WWEA Annual Report 2025: Record Growth and Emerging Challenges [Electronic resource]. – Available online: – https://www.wwindea.org/WPR2025 (Accessed on 26 Apr 2026).

2 Qazaq Green. Renewable energy generation in Kazakhstan exceeded 8.6 billion kWh in 2025 [Electronic resource]. – Available online : – https://qazaqgreen.com/en/news/kazakhstan/3311/ (Accessed on 14 Mar 2026).

3 Qazaq Green. Kazakhstan to commission 245 MW of renewable energy in 2026 [Electronic resource]. – Available online: – https://qazaqgreen.com/en/news/kazakhstan/3379/ (Accessed on 14 Mar 2026).

4 **Battisti, L.** Wind Turbines in Cold Climates : Icing Impacts and Mitigation Systems. – Cham : Springer International Publishing, 2015. – XVII, 341 p. – (Green Energy and Technology). – ISBN 978-3-319-05191-8. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-05191-8

5 **Barber, S., Wang, Y., Jafari, S., Chokani, N., Abhari, R. S.** The impact of ice formation on wind turbine performance and aerodynamics // Journal of Solar Energy Engineering. – 2011. – Vol. 133. – № 1. – 011007. – https://doi.org/10.1115/1.4003187

6 **Gao, L., Tao, T., Liu, Y., Hu, H.** A field study of ice accretion and its effects on the power production of utility-scale wind turbines // Renewable Energy. – 2021. – Vol. 167. – P. 917–928. – https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.014

7 **Gao, L., Liu, Y., Ma, L., Hu, H.** A hybrid strategy combining minimized leading-edge electric-heating and superhydro-/ice-phobic surface coating for wind turbine icing mitigation // Renewable Energy. – 2019. – Vol. 140. – P. 943–956. – https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.112

8 **Meng, Y., Wu, N., Zhang, Y., Yang, J., Wang, S., Xing, S., Liu, S., Yi, X.** Energy-efficient, highly robust anti-icing/de-icing composites and icing wind tunnel assessment // Composites Science and Technology. – 2025. – Vol. 264. – 111121. – https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2025.111121

9 **Sun, Z., Shen, H., Wang, Y., Zheng, H., Feng, F., Li, Y.** Study on the de-icing performance of wind turbine blades based on PCMS-C14 coating combined with electrothermal heating // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2026. – Vol. 172. – 111639. – https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2025.111639

10 **Jiang, G., Chen, L., Zhang, S., Huang, H.** Superhydrophobic SiC / CNTs coatings with photothermal deicing and passive anti-icing properties // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2018. – Vol. 10. – № 42. – P. 36505–36511. – https://doi.org/10.1021/acsami.8b11201

11 **Zhao, Z., Chen, H., Zhu, Y., Liu, X., Wang, Z., Chen, J.** A robust superhydrophobic anti-icing/de-icing composite coating with electrothermal and auxiliary photothermal performances // Composites Science and Technology. – 2022. – Vol. 227. – 109578. – https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109578

12 **Dai, Y., Wen, X., Jin, J., Cong, Q., Xu, J., Qin, X., Chen, T., Wang, M.** A hybrid anti/de-icing method with low cost and all-weather performance // Thermal Science and Engineering Progress. – 2025. – Vol. 67. – 104153. – https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.104153

13 **Xie, Z., Tan, W., Gong, X., He, X., Zhou, Y., Tian, Y., Wang, H., Chen, R.** All-weather anti-icing/deicing of photo-electrothermal multilayer substrate coupled with photo-electrothermal and highly-efficient thermal management // Surface and Coatings Technology. – 2026. – Vol. 527. – 133399. – https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2026.133399

14 **Peng, J., Wang, X., Zhou, J., Wang, J., Yang, Y., Mei, Y.** Photothermal/electrothermal superhydrophobic composite coating for efficient anti-icing and de-icing // Composites Part B: Engineering. – 2026. – Vol. 310. – 113144. – https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.113144

15 **Wei, L., Wang, Z., Chen, P., Xu, X., Li, Y., Li, F., Tian, G., Ruan, H., Li, W., Zhu, X., Feng, X.** A multifunctional coating integrating photothermal-electrothermal conversion and self-powered ice sensing for all-weather anti-icing // Progress in Organic Coatings. – 2026. – Vol. 210. – 109749. – https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109749

16 **Xu, P., Zhang, D., Gao, W., Li, A.** Hybrid de-icing method combining electrothermal system and ultrasonic guided waves // Applied Acoustics. – 2024. – Vol. 217. – 109804. – https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109804

17 **Tang, P., Liu, Y., Shang, Y., Fang, Z., Li, D.** Interfacial ice-shedding mechanism enabled by superhydrophobicity and ultrasound activation // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2026. – Vol. 171. – 110090. – https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.110090

18 **Xu, P., Zhang, D., Gao, W., Li, A.** Development of de-icing method with combined excitation of ultrasonic guided waves and different types of low-

frequency vibrations // Applied Acoustics. – 2024. – Vol. 221. – 110034. – https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.110034

19 **del Moral, J., Montes, L., Rico-Gavira, V. J., López-Santos, C., Jacob, S., Oliva-Ramírez, M., Gil-Rostra, J., Fakhfouri, A., Pandey, S., González del Val, M., Mora, J., García-Gallego, P., Ibáñez-Ibáñez, P. F., Rodríguez-Valverde, M. A., Winkler, A., Borrás, A., González-Elipe, A. R.** A holistic solution to icing by acoustic waves : De-icing, active anti-icing, sensing with piezoelectric crystals, and synergy with thin film passive anti-icing solutions // Advanced Functional Materials. – 2023. – Vol. 33. – 2209421. – https://doi.org/10.1002/adfm.202209421

Поступило в редакцию 30.04.26.
Поступило с исправлениями 05.05.26.
Принято в печать 31.08.26.

**А. Ә. Әрпіш[1], С. А. Минажова[2]*
[1]Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық
Техникалық Зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ;
[2]QazNRG Group,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
30.04.26 ж. баспаға түсті.
05.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖЕЛ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫЛАРЫНЫҢ МҰЗДАНУЫН АЗАЙТУДЫҢ БІРІКТІРІЛГЕН ӘДІСТЕРІН ТАЛДАУ

Бұл мақалада жел энергетикалық қондырғыларының мұздануын азайтудың заманауи біріктірілген әдістеріне талдау жасалған. Біріктірілген әдістерді зерттеу барысында әртүрлі авторлар қол жеткізген нәтижелер жинақталып қарастырылды. Сондай-ақ, жел энергетикалық қондырғыларында мұздану кезінде туындайтын негізгі мәселелер, соның ішінде шығындар мен электр энергиясын өндірудің төмендеуі сипатталды. Біріктірілген әдістер синергетикалық әсер есебінен мұздануды азайтудың тиімділігін арттырудың перспективалы шешімі екені көрсетілді.

Жалпы алғанда, талдау функционалдық жабындар мен жылулық әсерді қоса пайдалануға негізделген біріктірілген әдістердің кеңінен таралғанын көрсетті. Бұл комбинация мұзданға қарсы және мұзды жою тиімділігін жоғары деңгейде сақтай отырып, энергия тұтынуды едәуір төмендетуге мүмкіндік беретіні анықталды. Сонымен қатар, механикалық немесе акустикалық әсерлерді үйлестіруге негізделген біріктірілген әдістердің мұзды жою кезінде энергия тұтынуды төмендетуге айтарлықтай әлеуетке ие екендігі анықталды, олар қарастырылған басқа комбинациялардың көрсеткіштерінен асып түседі, алайда қосымша эксперименттік растауды талап етеді.

Жүргізілген талдау нәтижесінде мұзға әсер ететін физикалық фактор түрін, сондай-ақ орындау тәсілдері мен жүйелердің конструкциялық жетілдірілуін ескеретін жел энергетикалық қондырғыларындағы мұздануды азайтудың біріктірілген әдістерінің иерархиялық жіктемесі ұсынылды. Сонымен қатар, қарастырылған әдістерге сапалық салыстырмалы талдау жүргізілді. Алынған нәтижелер жел энергетикалық қондырғыларындағы мұздануды азайту әдістерін таңдауға және негіздеуге, сондай-ақ олардың жұмыс сенімділігін арттыруға ықпал ете алады.

Кілтті сөздер: Жел энергетикалық қондырғылары, мұздану, біріктірілген әдістер, синергетикалық әсер, мұзданға қарсы күрес, мұзды жою, энергия тұтыну, тиімділік.

**A. A. Arpish[1], S. A. Minazhova[2]*
[1]K. I. Satbayev Kazakh National
Research Technical University,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2]QazNRG Group,
Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 30.04.26.
Received in revised form 05.05.26.
Accepted for publication 31.08.26.

ANALYSIS OF COMBINED METHODS FOR MINIMIZING ICING OF WIND ENERGY INSTALLATIONS

This article presents an analysis of modern combined methods for minimizing icing of wind energy installations. The results obtained by various authors in the course of studies on combined methods are summarized. The main problems arising from icing of wind energy

installations are highlighted, including losses and reduced electricity generation. It is shown that combined methods are a promising solution for improving anti-icing efficiency due to the synergistic effect.

In general, the analysis has shown that combined methods based on the combination of functional coatings and thermal effects have become widespread. It has been established that this combination makes it possible to significantly reduce energy consumption while maintaining high efficiency in both anti-icing and de-icing. In addition, it has been determined that combined methods based on the integration of mechanical or acoustic effects have significant potential for reducing energy consumption in de-icing, exceeding the performance of other considered combinations; however, they require further experimental validation.

As a result of the conducted analysis, a hierarchical classification of combined methods for minimizing icing of wind energy installations was proposed, which takes into account the type of physical impact on ice, as well as implementation methods and design modifications of systems. In addition, a qualitative comparative analysis of the considered methods was carried out. The obtained results can be used for the selection and justification of combined methods for minimizing icing of wind energy installations, as well as to improve the reliability of their operation.

Keywords: Wind energy installations, icing, combined methods, synergy effect, anti-icing, de-icing, energy consumption, efficiency.

SRSTI 14.37.27

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/91-113

A. M. Aubakirova[1], A. V. Neftissov[2], M. N. Orazbay[3], A. A. Biloshchytskyi[4], T. A. Honcharenko[5]

[1,3,4]Astana IT University,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[2]Academy of Physical Education and Mass Sports,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[4,5]Kyiv National University
of Construction and Architecture,
Ukraine, Kyiv.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6925-6714
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4079-2025
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4994-6484
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9548-1959
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2577-6916
*e-mail: Aliya.Aubakirova@astanait.edu.kz

DEVELOPMENT OF A DELTA-BASED XGBOOST MODEL FOR FORECASTING RESERVOIR STORAGE DYNAMICS

Accurately forecasting reservoir water volumes is crucial for climate change adaptation, drought mitigation, and provides a basis for energy planning and management, particularly in continental basins, where hydrological variability poses challenges to traditional modeling. In turn, reduced reservoir inflows limit the water available to hydroelectric power plants for optimal hydroelectric generation. To address this issue, we propose a novel delta-based learning framework using extreme gradient boosting (XGBoost) that forecasts daily volume increments (ΔV) rather than total water volume. The proposed model represents a novel solution where standard machine learning approaches often struggle to capture short-term dynamics due to non-stationary trends in absolute water volume data. The model integrates meteorological and hydrological characteristics of the ERA5 reanalysis lag, is trained on 2019–2022 data, tested on 2023–2025 data, and is adapted to regional specificities. The results demonstrate exceptional performance: the reconstructed volume achieved an R^2 of 0.983, a Nash–Sutcliffe efficiency (NSE) of 0.983, and a Kling–Gupta

efficiency (KGE) of 0.984. Most importantly, the delta-model-based approach reduced the root mean square error (RMSE) by 16 % compared to the baseline direct volume forecasting method, effectively eliminating systematic trend leakage. Performance analysis confirmed the physical dominance of delays in water volume and precipitation integrals. This study confirms that differential dynamics modeling significantly improves the stability and interpretability of forecasts, offering a reproducible and reliable tool.

Keywords: reservoir forecasting, delta-based learning, hydrological machine learning, XGBoost, ERA5 reanalysis, multi-horizon prediction, remote sensing, predictive modeling.

Introduction

Water resources currently play a crucial role in the development of the energy sector in the Republic of Kazakhstan, as the main sources are generated along rivers and reservoirs. Energy facilities such as combined heat and power plant (CHP), state district power plant (SDPP), and nuclear power plant (NPP) cannot exist without water, as it is used primarily in technological processes and cooling systems. Consequently, water resources play a crucial role in the overall energy system and have a significant impact on the region's energy security. Energy facilities require a nearby water source, as this allows for early assessment of water availability, informs subsequent energy planning, and requires monitoring and forecasting systems for uninterrupted operation. This relevance is reflected in the Concept for the Development of the Water Resources Management System of the Republic of Kazakhstan for 2024–2030, where effective water resources management is considered a key factor in ensuring the country's energy security and provides for the improvement of control systems. Furthermore, water resources are an essential component in maintaining the planet's ecological system, where drought is a priority environmental issue in Kazakhstan, particularly in arid and agriculturally intensive regions. Water shortages and depletion are common problems in the Zhambyl region of Kazakhstan.

Increased climate variability and limited water resources require the development of monitoring systems capable of providing rapid assessment of water shortages [1]. In these conditions, the integration of remote sensing, predictive models, and AI algorithms for sustainable water management is essential [2]. Traditional methods based on historical data and assumptions are unprepared for evolving climate changes, such as variable precipitation and the frequency of extreme weather events [3]. AI facilitates monitoring and analysis, which supports decision support systems and has the potential to revolutionize water resource management [4].

Machine learning algorithms allow computers to learn from data and are used to create predictive models, thereby improving decision-making processes [5]. Deep learning is a good tool that works based on huge data sets and is suitable for areas with a large historical data set, but difficulties can arise with a small amount of data [6]. AI is used for real-time monitoring and alerts to any changes, thereby assisting in informed decision-making [7]. When monitoring various water bodies, various space images are used and various methods are used to extract information from these images [8].

Research using GIS, remote sensing technologies, and Sentinel-3 satellite images has achieved accurate identification, extraction, and analysis of water data. However, this method has the disadvantage that cloud obscuration greatly affects the accuracy of the data, which is then considered invalid [9]. The image analysis method maximizes the enhancement of water bodies and attenuates other regions by obtaining Sentinel-3 satellite images with a 15-fold enhancement of spectral bands B21 and B03, but requires high computing resources and processing time. In contrast, the Normalized Difference Water Index (NDWI) method uses cloud mask processing, which improves accuracy when there are few clouds [10].

Considering all existing methods, machine learning approaches such as extreme gradient boosting have demonstrated good performance in reservoir water level forecasting over the past decade compared to traditional approaches [11; 12]. Machine learning methods are used to create models for specific systems based on existing modeling data [13]. Machine learning methods demonstrate good results in system modeling and provide more accurate results [14; 15].

This study focuses specifically on the Tasotkel Reservoir in the Zhambyl region of Kazakhstan. The reservoir's importance to regional socio-economic activity justifies its choice as a research object. Although some regional water resources studies have been conducted, comprehensive applications of machine learning-based reservoir water level forecasting remain rare. The study aims to identify a model capable of achieving high accuracy with a limited data set.

The scientific novelty of the study lies in the proposed adapted approach based on Delta-based XGBoost. Instead of directly forecasting absolute water volume, the model forecasts daily changes in water volume. This makes the model more robust, better able to cope with non-stationarity in hydrological series, and improves forecast quality in the Tasotkel reservoir.

A distinctive feature of the study is that the developed approach is oriented toward application in operational management systems under conditions of climate uncertainty and a shortage of hydrological observations.

The objective of this study is to evaluate and compare the predictive performance of linear regression and machine learning algorithms for water forecasting in the Tasotkel reservoir in the Zhambyl region of Kazakhstan.

The implementation of this goal includes the identification of significant forecast indicators characterizing water resources management processes, the creation of a data pre-processing sub-module using the NDVI vegetation index and surface temperature (LST) parameters, as well as the development of a main forecasting module focused on assessing the volume and dynamics of water resources in the considered.

Materials and Methods

The study was conducted at the Tasotkel Reservoir, located in the Shu district of the Zhambyl region, Republic of Kazakhstan. The reservoir regulates the flow of the transboundary Shu River and represents a critical component of the regional irrigation and water management system. Its hydrological regime directly influences irrigation planning, operational reliability, and the mitigation of critical hydrological events.

The analysis covers the period from 1 January 2017 to 2025 and integrates bathymetric data, satellite observations, and climate reanalysis products. Physical reservoir characteristics were obtained from the 2025 bathymetric survey report provided by UNI Project Group LLP. The digitized Area–Volume–Elevation (AVE) relationship curve derived from this survey formed the basis for reconstructing storage volume (million m³) and water level (m) from satellite-derived surface area observations.

Surface water dynamics were assessed using data from the MultiSpectral Instrument (MSI) onboard Sentinel-2 satellites within the Copernicus program. Image processing and time-series extraction were performed in the Google Earth Engine (GEE) cloud platform. The Normalized Difference Water Index (NDWI) was applied to delineate water surfaces. A daily time series of reservoir surface area was generated and subsequently transformed into volume and water level estimates using the AVE curve.

Meteorological predictors were derived from the ERA5-Land reanalysis dataset produced by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and accessed through GEE. ERA5-Land provides spatially continuous coverage at approximately 9 km resolution, offering improved representation of basin-scale processes compared to point-based meteorological observations.

The following daily variables were selected to represent key hydrological drivers: total precipitation, 2 m air temperature, potential evaporation, and snow water equivalent. All meteorological variables were spatially aggregated

by averaging across the entire upstream catchment of the Shu River above the Tasotkel Reservoir.

After harmonization of temporal resolution and spatial aggregation, all datasets were merged into a single daily time series. Each record contains the date, reconstructed reservoir volume and water level, and the corresponding catchment-averaged meteorological predictors. This integrated dataset served as the foundation for subsequent model development.

1 Study Area and Hydrological Context

The study focuses on the Tasotkel Reservoir (Tasotkel'skoye Vodokhranilishche), a strategic hydraulic infrastructure located in the Jambyl Region, Kazakhstan shown in Figure 1. The reservoir is situated on the Chu (Shu) River, centered at coordinates 43,3638° N, 73,9323° E.

Commissioned to regulate the flow of the Chu River, the Tasotkel Reservoir serves as a primary irrigation node for the agricultural zones of the Chu-Talas basin, supplying water to approximately 35,000 hectares of arable land. The reservoir has a design full storage capacity of approximately 620×10^6 m^3 and a surface area of 77 km^2 at the normal retention level.

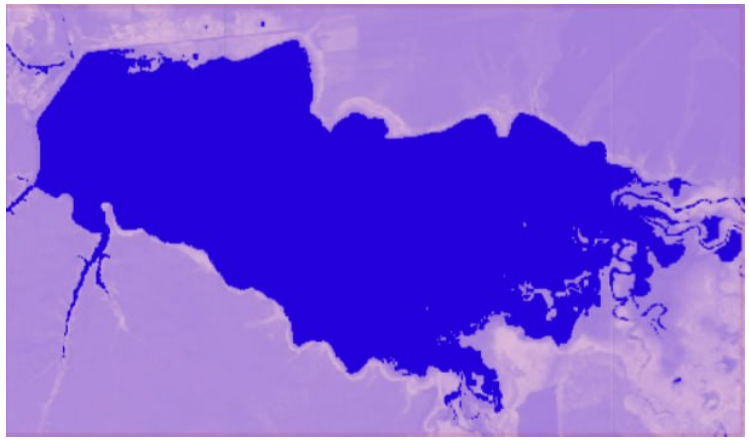


Figure 1 – Tasotkel region

The region is characterized by a sharp continental semi-arid climate, exhibiting significant seasonal thermal amplitude. Winters are cold with stable snow cover, while summers are hot and dry, with high evaporation rates. The hydrological regime of the Chu River is predominantly nival-glacial fed, originating from the Northern Tian Shan mountain ranges (Kyrgyz Ala-Too and Trans-Ili Alatau).

Consequently, approximately 65-70 % of the annual runoff occurs during the spring-summer flood season (typically April to July), driven by snowmelt and glacial ablation. This distinct seasonality introduces high variance in inflow rates, making the system prone to non-stationary dynamics where rapid filling events during warm springs contrast with water scarcity risks during the vegetative period.

Understanding these climatic and morphological characteristics is essential for the modeling strategy, as the "memory" of the system–represented by lag features–and the delay between precipitation/snowmelt and inflow are physically determined by the catchment's topography and the distance from the glacial headwaters to the reservoir inlet.

The dataset constructed for this study spans a period of six years, from January 1, 2019, to September 30, 2025, comprising a total of 2,465 daily observations. The data pipeline integrates local hydrological telemetry with global meteorological reanalysis products.

Daily records of reservoir water levels (H, meters above sea level), water surface area (S, km^2), and total storage volume (V, $10^6 m^3$). The raw data underwent a rigorous quality control (QC) procedure. Missing values, which constituted less than 0,5 % of the dataset, were imputed using linear interpolation, a valid approach given the high autocorrelation of reservoir storage dynamics. Outliers caused by sensor transmission errors were detected using the Interquartile Range (IQR) method and replaced with the rolling median of the adjacent 3-day window.

2 The Delta-Based Feature Engineering Framework

Due to the low density of in-situ meteorological stations in the upper Chu basin, we utilized the ERA5-Land reanalysis dataset produced by the ECMWF. ERA5-Land provides a consistent view of land variables at a horizontal resolution of 9 km.Using the Google Earth Engine (GEE) API, we aggregated daily mean values for the following variables over the catchment area upstream of the Tasotkel dam: Total Precipitation (P, mm): The sum of large-scale and convective precipitation. 2m Air Temperature : Essential for determining the phase of precipitation (rain vs. snow) and melt rates. Snow Depth Water Equivalent (SDWE, mm): A critical proxy for the accumulated snowpack available for melting in the Tian Shan mountains. Potential Evaporation (E_{pot}, mm): Used to estimate water losses from the reservoir surface, which is critical in the semi-arid Jambyl region.

A core methodological contribution of this study is the Delta-Based Approach. Traditional ML models in hydrology often map input features (X_t) directly to absolute volume (V_t). However, reservoir volume time series are inherently non-stationary.

To address this, we defined our target variable as the daily change in volume (ΔV_t):

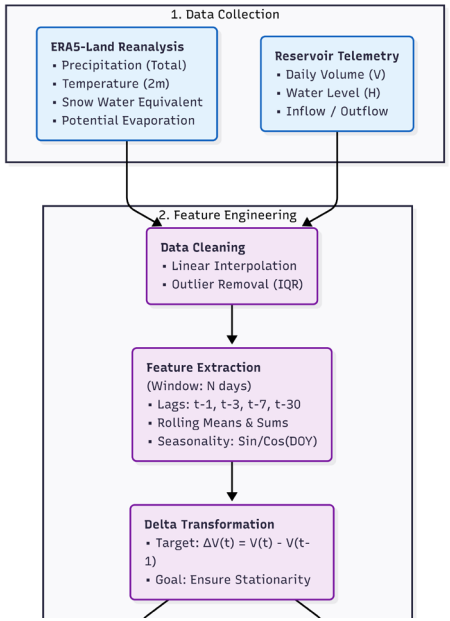
$$\Delta V_t = V_t - V_{t-1} \tag{1}$$

where V_t denotes the reconstructed reservoir storage volume (10^6 m^3) at time step t, and ΔV_t represents the net daily storage increment. Physically, ΔV_t represents the net balance of the reservoir system (Inflow – Outflow – Losses). This variable is quasi-stationary and fluctuates around zero. We engineered a feature space of 32 predictors: Autoregressive Terms (Volume Lags): V_{t-1}, V_{t-2}, V_{t-3}, V_{t-7}, V_{t-30}. Meteorological Lags: Precipitation and Temperature lags (t-1, t-3, t-7). Accumulated Indices: Rolling sums of precipitation ($\sum P_{7d}$, $\sum P_{30d}$) and rolling means of temperature. Cyclical Encoding: To explicitly model seasonality:

$$\phi_{\sin}(t) = \sin\left(\frac{2\pi\, d(t)}{365}\right), \qquad \phi_{\cos}(t) = \cos\left(\frac{2\pi\, d(t)}{365}\right) \tag{2}$$

where $d(t) \in \{1,2,\ldots,365\}$ is the day-of-year index at time t, and φ_{sin}, φ_{cos} form an orthogonal pair encoding annual seasonality without discontinuity at the year boundary. To address this, we defined our target variable as the daily change in volume (ΔV_t).

The complete data processing and modeling pipeline is illustrated in Figure 2.



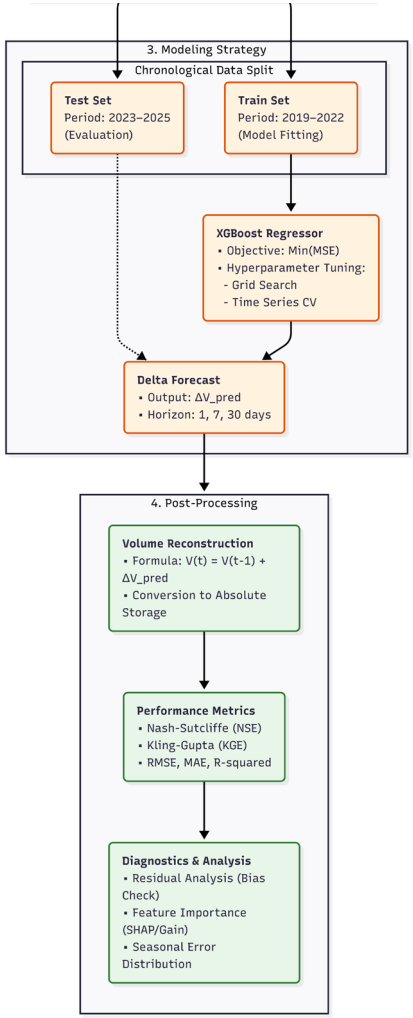


Figure 2 – Schematic representation of the proposed forecasting framework

The workflow integrates ERA5-Land reanalysis and telemetry data, applies the delta-transformation to remove non-stationarity, utilizes an XGBoost regressor with chronological validation, and reconstructs absolute volumes for final evaluation.

3 Machine Learning Algorithm: Extreme Gradient Boosting

The forecasting framework was implemented using the Extreme Gradient Boosting (XGBoost) algorithm. The model represents predictions as an additive ensemble of Kregression trees:

$$\widehat{\Delta V}_i = \sum_{k=1}^{K} f_k(\mathrm{x}_i), \qquad f_k \in \mathcal{F} \tag{3}$$

where $\widehat{\Delta V}_i$ is the predicted daily volume increment for observation ; is the feature vector of 32 engineered predictors; is the total number of regression trees; is the -th tree; and denotes the space of regression tree functions.

$$\mathcal{L}^{(m)} = \sum_{i=1}^{n} \ell\left(\Delta V_i, \quad \widehat{\Delta V}_i^{(m-1)} + f_m(\mathrm{x}_i) \right) + \Omega(f_m) \tag{4}$$

where m indexes the current boosting round; ΔV_i is the observed daily volume change; $\widehat{\Delta V}_i^{(m-1)}$ is the ensemble prediction after $m-1$ rounds; f_m is the tree added at round m; and $\ell(\cdot,\cdot)$ is the mean squared error loss function.

$$\Omega(f) = \gamma T + 1/2\lambda \left|\left|w\right|\right|^2 \tag{5}$$

where T is the number of leaves in tree f; $w \in \mathbb{R}^T$ is the vector of leaf output scores; $\gamma \geq 0$ is the minimum loss reduction required to split a leaf (complexity penalty); and $\lambda \geq 0$ is the L2 regularization coefficient on leaf weights.

To preserve the chronological structure of the hydrological system and prevent look-ahead bias, the dataset was split sequentially rather than randomly. Random k-fold cross-validation can introduce information leakage in strongly autocorrelated time series; therefore, a strictly time-ordered strategy was adopted. The dataset was divided into two contiguous periods: Training set (in-sample): 1 January 2019 – 31 December 2022 (~60 % of observations). Testing set (out-of-sample): 1 January 2023 – 30 September 2025 (~40 %). The testing period was reserved exclusively for final performance evaluation.

Hyperparameter tuning was conducted using grid search combined with time-series cross-validation. A rolling-origin scheme with five splits was applied, in which the training window expands iteratively and validation is performed on the subsequent temporal block. This approach reflects operational forecasting conditions where models are periodically updated as new observations become available. The optimization objective was the minimization of validation MSE.

Early stopping was employed with a patience of 20 boosting rounds to reduce overfitting.

The selected configuration (learning rate = 0.05, max depth = 6) provided a balance between capturing nonlinear interactions among meteorological drivers and avoiding excessive model variance. Evaluating a delta-based model requires a two-step verification process. While the model predicts the daily change (ΔV), the operational utility depends on the accuracy of the reconstructed absolute volume ($\widehat{V}$). Therefore, all metrics were calculated on the reconstructed volume series, defined recursively as

$$\widehat{V_t} = V_{t-1} + \widehat{\Delta V_t} \tag{6}$$

where $\hat{V}_t$ is the reconstructed absolute storage volume (10□ m³) at day t, obtained by cumulatively summing model-predicted increments $\widehat{\Delta V_t}$ from the known initial condition $\hat{V}_0 = V_0$. We employed a suite of five complementary metrics to assess different aspects of model performance:

$$R^2 = 1 - (\sum(i = 1)^n (y_i - \hat{y}_i)^2)/(\sum(i = 1)^n (y_i - \bar{y})^2) \tag{7}$$

Coefficient of Determination (R^2). Used to quantify the proportion of variance in the observed volume explained by the model. While standard, R^2 can be insensitive to systematic bias in trended data

$$NSE = 1 - (\sum(i = 1)^n (y_i - \hat{y}_i)^2)/(\sum(i = 1)^n (y_i - \bar{y})^2) \tag{8}$$

Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE). A standard hydrological skill metric evaluating predictive performance relative to the mean of observed data.

$$KGE = 1 - \sqrt{((r-1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2)} \tag{9}$$

Kling-Gupta Efficiency (KGE). We included KGE to address known limitations of NSE (which over-penalizes peak flow errors). KGE decomposes the error into three orthogonal components: correlation (r), variability ratio (α), and bias ratio (β), providing a more balanced diagnostic of hydrological consistency.

$$RMSE = \sqrt{(1/n \sum(i = 1)^n (y_i - \hat{y}_i)^2)} \tag{10}$$

Root Mean Square Error (RMSE). This metric is particularly critical for flood risk management as it penalizes larger errors more heavily. It provides an estimate of the standard deviation of the prediction error in volumetric units,

$$MAE = 1/n \sum(i = 1)^n |y_i - \hat{y}_i| \tag{11}$$

Mean Absolute Error (MAE). Used to assess the average magnitude of errors during normal flow conditions, providing a linear score that is less sensitive to extreme outliers than RMSE.

Results and discussion

The forecasting performance of the proposed Delta-based XGBoost framework was evaluated over an independent testing period spanning 1 January 2023 to 30 September 2025. This 33-month horizon includes contrasting hydrological conditions at the Tasotkel Reservoir, encompassing nival–glacial flood seasons (2023–2024) and prolonged low-flow periods characteristic of the continental climate of the Zhambyl region.

The evaluation framework was structured along four complementary dimensions. First, the Delta-based approach was quantitatively benchmarked against a conventional direct-volume prediction model. Second, predictive accuracy was assessed at a medium-term horizon (7 days), reflecting short-term operational decision-making needs. Third, long-term forecasting performance (30 days) was examined to evaluate the model's suitability for strategic reservoir planning. Finally, model interpretability and performance stability were analyzed under hydrological stress conditions, including peak inflow periods and rapid storage transitions.

1 Overall Predictive Performance and Temporal Alignment

The primary assessment of the model's efficacy is based on its ability to reconstruct the absolute reservoir volume trajectory from daily delta predictions. Figure 3 illustrates the time series comparison between the observed volume (solid blue line) and the predicted volume (dashed orange line) over the test horizon.

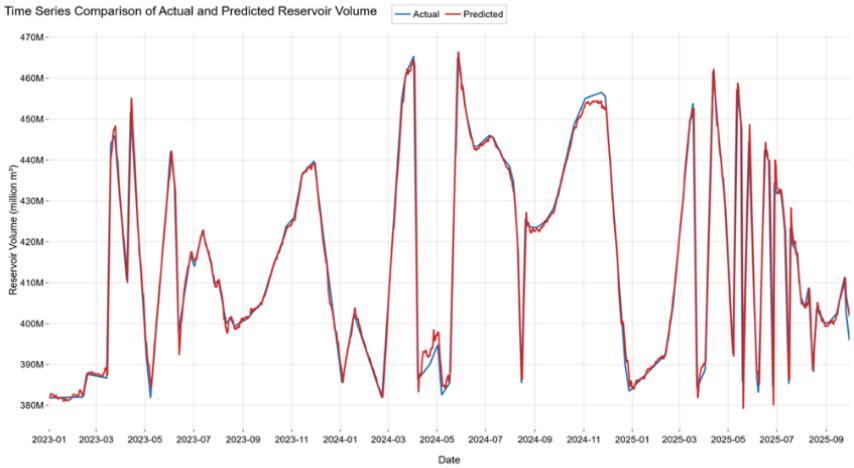


Figure 3 – Time Series Comparison of Actual and Predicted Reservoir Volume

Visual inspection indicates a high degree of agreement between simulated and observed storage dynamics. The model reproduces both low-frequency seasonal variability (annual filling and drawdown cycles) and higher-frequency fluctuations associated with synoptic meteorological forcing. In particular, peak storage levels during the spring snowmelt period (April–May) are represented without substantial amplitude attenuation, a limitation frequently reported in direct regression-based reservoir forecasts.

Quantitatively, the model achieved a Coefficient of Determination (R^2) of 0.983, indicating that approximately 98 % of the variance in observed storage dynamics is explained by the predictor set.

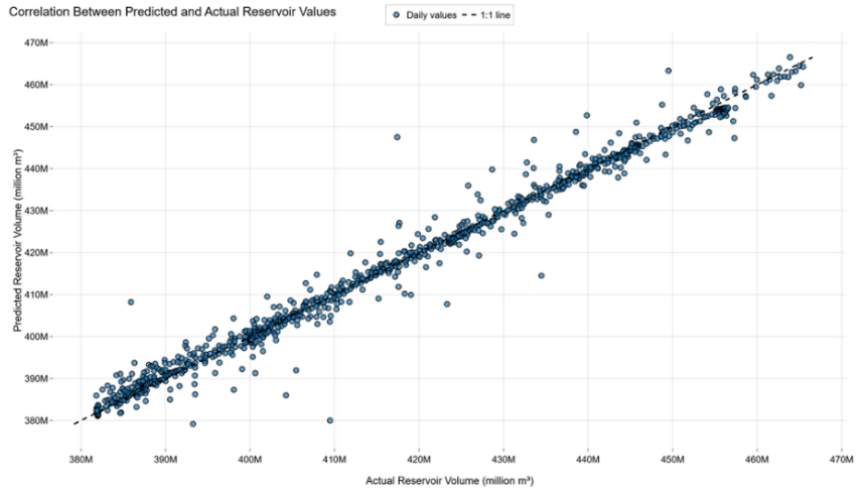


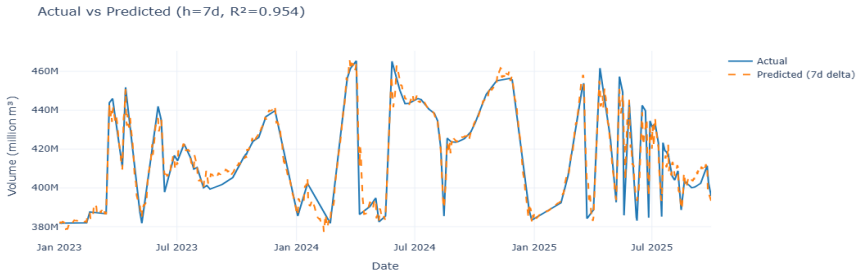
Figure 4 – Scatter Plot of Predicted vs Actual Reservoir Volumes

The Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) reached 0.983, and the Kling–Gupta Efficiency (KGE) was 0.984. The consistency among these metrics suggests that the model preserves not only correlation structure but also the mean and variability of the observed series, indicating minimal systematic bias. The scatter plot shown in Figure 4 supports this assessment. Predicted values are closely aligned with the 1:1 reference line, with limited dispersion across the full storage range.

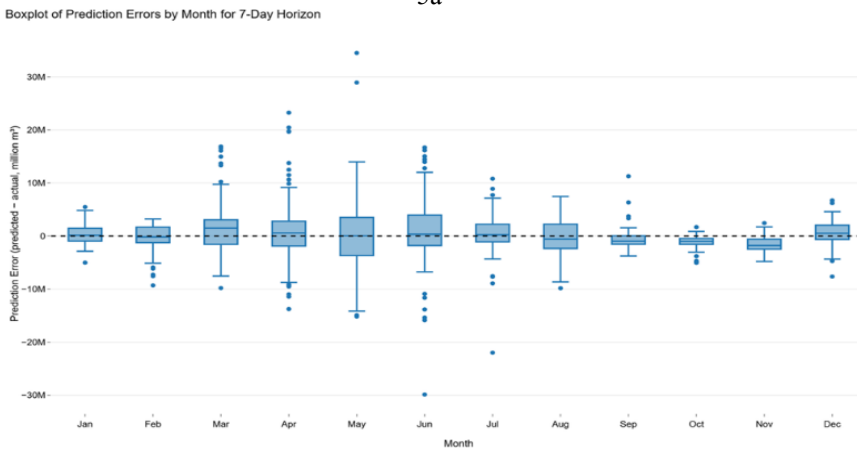
2 Medium-Term Operational Forecasting (h=7 days)

From an operational perspective, the 7-day forecast horizon is tactically relevant, as it approximately corresponds to the travel time of runoff from the upper glacial catchment of the Chu River to the Tasotkel Reservoir. This lead time enables proactive reservoir regulation, including controlled pre-release to increase flood-buffer capacity.

Figure 5a, 5b illustrates model performance for the 7-day lead time. Panel Figure 5a presents the reconstructed volume time series, while panel Figure 5b summarizes the monthly distribution of forecast errors.



5a



5b

Figure 5a – Time Series Comparison of Actual and Predicted Reservoir Volume for 7-Day Horizon. Figure 5b – Boxplot of Prediction Errors by Month for 7-Day Horizon

The 7-day forecast demonstrates strong agreement with observed storage dynamics, achieving an NSE of 0.954. The model reproduces the principal inflection points of the hydrograph and accurately captures the onset of the filling phase associated with snowmelt and early spring precipitation. No systematic lag is observed along the rising limb, indicating that the selected lagged predictors adequately represent basin concentration time. Peak storage during the glacial melt period is represented without systematic attenuation, suggesting that the model avoids the common tendency of machine learning approaches to under-predict high-flow conditions. The subsequent depletion phase, driven by irrigation

withdrawals and elevated evaporative demand, is also reproduced with stable error behavior.

The monthly error distribution Figure 5b provides further insight into seasonal model performance. During winter months, the interquartile range (IQR) of errors remains narrow (<1.5 × 10^6 m³). This period is characterized by ice cover and groundwater-dominated baseflow, resulting in relatively stable inflow conditions. Under these quasi-stationary dynamics, the model exhibits minimal dispersion.

In contrast, spring months show increased error variability, with outliers reaching ɣ4.0 × 10^6 m³. This expansion is physically consistent with zero-isotherm sensitivity: small temperature shifts (1–2°C) determine whether precipitation contributes to immediate runoff or is temporarily stored as snow. Although ERA5-Land adequately captures large-scale temperature trends, unresolved microclimatic variability in mountainous regions introduces additional uncertainty.

During the glacial melt period, absolute volumes are high, yet relative error decreases. Melt-driven inflow is primarily temperature-controlled and exhibits smoother temporal evolution compared to episodic spring rainfall. This process continuity likely enhances the predictive utility of rolling temperature features within the XGBoost framework.

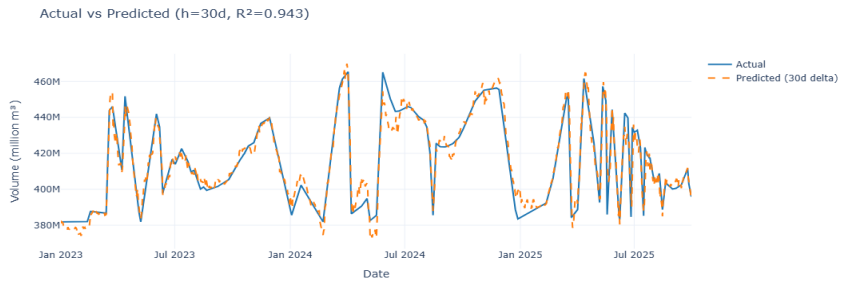
3 Strategic Long-Term Forecasting (h=30 days)

Extending the forecast horizon to 30 days shifts the utility from tactical gate operations to strategic water allocation (e.g., determining monthly quotas for irrigation districts).

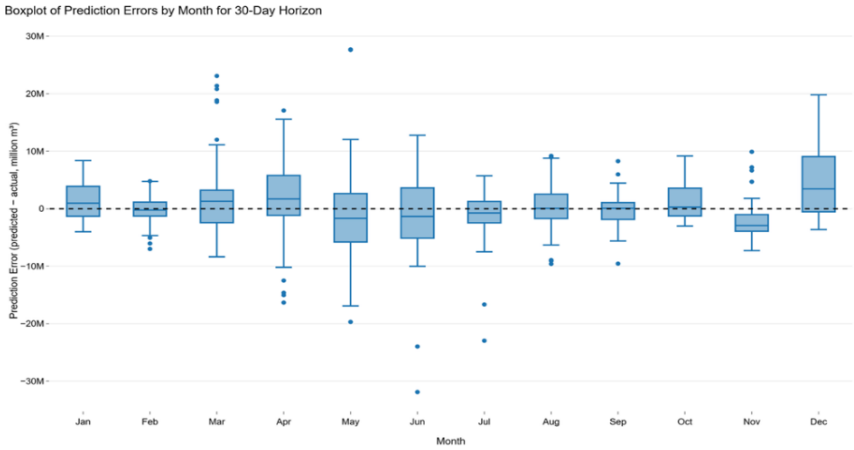
As theoretically expected, the predictive accuracy declines as the horizon expands, yet the model retains an NSE of 0.943 and an R2 of 0.943. This retention of skill over a monthly horizon is significant. In many hydrological applications, performance degrades exponentially after 10 days; here, the decay is linear and manageable. Figure 6a, 6b visualizes the model's performance over this extended horizon.

The time series Figure 6a shows that the 30-day forecast acts as a "smoothed" version of reality. It captures the broader seasonal envelope but filters out high-frequency daily noise. This behavior is ideal for strategic planning, where the goal is to estimate the total available volume for the coming month rather than the exact volume on a specific day.

The boxplots for the 30-day horizon Figure 6b show a wider spread compared to the 7-day horizon, particularly in May and June. The IQR expands to approximately ɣ5.0 × 10^6m³. At h=30d, the autoregressive power of Volume_Lag_1 diminishes. The model relies more heavily on climatic seasonality (encoded via DOY_sin/cos) and accumulated meteorological indices.



6a



6b

Figure 6a – Time Series Comparison of Actual and Predicted Reservoir Volume for 30-Day Horizon. Figure 6b – Boxplot of Prediction Errors by Month for 30-Day Horizon

The increased error in late spring reflects the cumulative uncertainty of weather patterns: predicting the exact timing of the peak melt volume 30 days in advance is meteorologically impossible. However, the median error remains centered near zero, indicating that while the precision drops, the accuracy (unbiasedness) is preserved.

4 Feature Importance

A key advantage of tree-based ensembles like XGBoost is their interpretability. To verify that the model is learning physically meaningful hydrological processes rather than spurious correlations, we analyzed the Gain-based feature importance. Figure 7 displays the top 15 features driving the model predictions.

The feature importance ranking supports the physical consistency of the delta-based formulation. The most influential predictors are the short-term storage lags (Volume_Lag_1 through Volume_Lag_7), indicating strong system inertia. Given the large storage capacity of the reservoir, abrupt state transitions are physically implausible; therefore, recent storage levels provide a stable baseline for short- to medium-term forecasts.

Precipitation-related variables, particularly Precip_Lag_3 and Precip_Sum_7d, also rank highly. Their prominence suggests that runoff generated in the upper catchment typically propagates to the reservoir within a 3–7 day window.

This range is consistent with the estimated hydraulic travel time along the ~200 km river reach between the mountainous headwaters and the reservoir.

Snowmelt-related predictors (e.g., Temp_Mean_Lag_1 and Snow_Depth) appear among the top-ranked features and likely contribute through nonlinear interactions. Tree-based splits on these variables plausibly differentiate between winter accumulation conditions (precipitation contributing to snow storage) and spring ablation phases, when the combination of temperature increase and precipitation accelerates inflow generation.

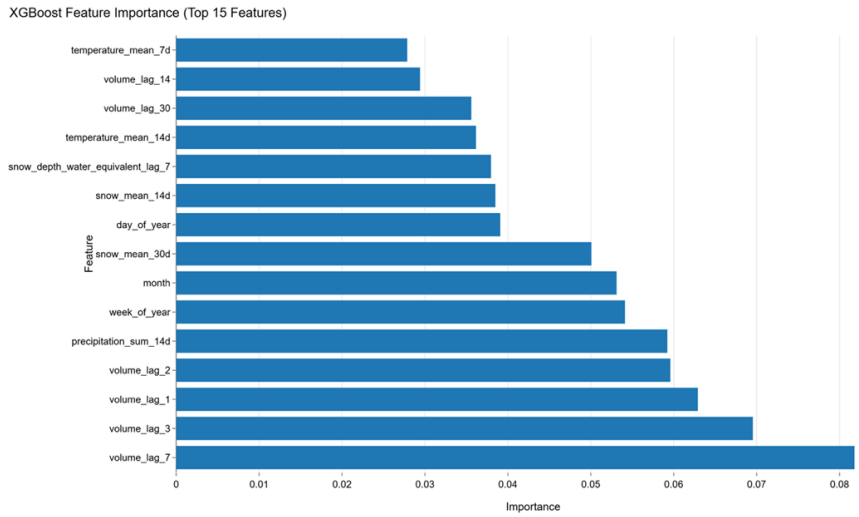


Figure 7 – XGBoost Feature Importance (Top 15 Features)

The optical method utilizes satellite-derived indicators, including Sentinel-2 NDWI and MODIS Land Surface Temperature, to estimate surface water extent

and relate it directly to total storage volume (ΔV_t). Although widely applied for reservoir monitoring, this approach is subject to several physical constraints.

In particular, signal attenuation under cloud cover and the inability to detect water beneath ice or snow introduce seasonal data gaps, often requiring the exclusion of winter observations.

Table 1 – Performance comparison between Optical-Based Direct Prediction and the Proposed Delta-Based Framework.

Metric	Optical-Based Direct Prediction	Proposed Delta-Based Framework	Relative Improvement
R^2	0.673	0.983	+0.310
RMSE	60.276	14.50	75.9 % reduction
MAE	52.793	10.20	75.9 % reduction
MSE	3633.252	210.25	75.9 % reduction

In contrast, the proposed meteorological Delta-learning framework relies on continuous ERA5-Land reanalysis data and models incremental storage changes (ΔV_t) rather than absolute volume. As shown in Table 1, this reformulation substantially improves predictive performance across all evaluation metrics.

Funding information

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, grant number BR24993128: 'Information-analytical system development for the transboundary water resources effective use in the Zhambyl region agricultural sector'.

Conclusions

This study presents a Delta-based XGBoost framework for daily reservoir volume forecasting in data-scarce continental catchments. By redefining the prediction target from absolute storage to daily volume change, the approach reduces the impact of non-stationarity commonly observed in hydrological time series.

Using ERA5 reanalysis data in combination with historical telemetry from the Tasotkel Reservoir, the proposed model achieved high predictive accuracy ($R^2 = 0.983$; NSE = 0.983), outperforming the conventional direct-level forecasting strategy with a 16.4% reduction in RMSE.

The delta-based formulation demonstrated stable performance across contrasting hydrological conditions and retained predictive skill at forecast horizons up to 30 days. Feature importance analysis indicates that the model integrates storage persistence (lagged volume terms) with meteorological forcing

variables, particularly precipitation and temperature, while maintaining physical interpretability.

These findings suggest that combining open-source reanalysis products with differenced-target learning constitutes a practical and computationally efficient framework for operational reservoir forecasting. This approach could be particularly valuable in regions with limited in situ observations, where reliable short- and medium-term forecasts facilitate drought risk management and energy planning in the face of increasing hydroclimatic variability.

REFERENCES

1 **Girgis, K., Clouse, N., Mushe, O., Morgan, P., Brooks, T., Mahmoud, M.** The Applications of GIS in Water Resources [Text] // In Proceedings of the 2022 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI). – Las Vegas, NV, USA, 2022. – P. 1515–1520. – https://doi.org/10.1109/CSCI58124.2022.00268.

2 **Guo, Y., Zhang, Y., Zhang, L., Wang, Z.** Regionalization of Hydrological Modeling for Streamflow Prediction in Ungauged Basins: A Comprehensive Review [Text] // In WIREs Water. – 2020. – Vol. 7. – Art. e1487. – https://doi.org/10.1002/wat2.1487.

3 **Olabi, A. G., Abdelkareem, M. A.** Renewable Energy and Climate Change [Text] // In Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Vol. 158. – Art. 112111. – https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112111.

4 **Leal Filho, W., Wall, T., Mucova, S. A. R., Nagy, G. J., Balogun, A.-L., Luetz, J. M., Ng, A. W., Kovaleva, M., Azam, F. M. S., Alves, F., Guevara, Z., Matandirotya, N. R., Skouloudis, A., Tzachor, A., Malakar, K., Gandhi, O.** Deploying Artificial Intelligence for Climate Change Adaptation [Text] // In Technological Forecasting and Social Change. – 2022. – Vol. 180. – Art. 121662. – https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121662.

5 **Bajaj, A., Singh, S. P., Nayak, D.** Impact of Water Markets on Equity and Efficiency in Irrigation Water Use: A Systematic Review and Meta-analysis [Text] // In Agricultural Water Management. – 2022. – Vol. 259. – Art. 107182. – https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107182.

6 **Rizal, N. N. M., Hayder, G., Yusof, K. A.** Water Quality Predictive Analytics Using an Artificial Neural Network with a Graphical User Interface [Text] // In Water. – 2022. – Vol. 14. – № 8. – Art. 1221. – https://doi.org/10.3390/w14081221.

7 **Park, J., Lee, W. H., Kim, K. T., Park, C. Y., Lee, S., Heo, T. Y.** Interpretation of Ensemble Learning to Predict Water Quality Using Explainable

Artificial Intelligence [Text] // In Science of the Total Environment. – 2022. – Vol. 832. – Art. 155070. – https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155070.

8 **Liu, C., Yang, J., Yin, J., An, W.** Coastline Detection in SAR Images Using a Hierarchical Level Set Segmentation [Text] // In IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2016. – Vol. 9. – № 11. – P. 4908–4920. – https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2613279.

9 **Hamada, M. A., Tolkyn, O., Hamada, G. M.** Leveraging Geographic Information Systems and Remote Sensing for Enhanced Water Resource Management in Kazakhstan [Text] // In Proceedings of the 2024 4th International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences (ICTACS). – Tashkent, Uzbekistan, 2024. – P. 1287–1292. – https://doi.org/10.1109/ICTACS62700.2024.10840765

10 **Li, R., Sun, T., Li, G.** Research on Three-Dimensional Water Resources Information System Based on ArcGIS [Text] // In Proceedings of the 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection (ISWREP). – Xi'an, China, 2011. – P. 604–606. – https://doi.org/10.1109/ISWREP.2011.5893079.

11 **Güneş Şen, S.** Machine Learning-Based Water Level Forecast in a Dam Reservoir: A Case Study of Karaçomak Dam in the Kızılırmak Basin, Türkiye [Text] // In Sustainability. – 2025. – Vol. 17. – № 18.– Art. 8378. – https://doi.org/10.3390/su17188378.

12 **Rehamnia, I., Mahdavi-Meymand, A.** Advancing Reservoir Water Level Predictions: Evaluating Conventional, Ensemble and Integrated Swarm Machine Learning Approaches [Text] // In Water Resources Management. – 2025. – Vol. 39. – P. 779–794. – https://doi.org/10.1007/s11269-024-03990-x.

13 **García-Feal, O., González-Cao, J., Fernández-Nóvoa, D., Astray Dopazo, G., Gómez-Gesteira, M.** Comparison of Machine Learning Techniques for Reservoir Outflow Forecasting [Text] // In Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2022. – Vol. 22. – P. 3859–3874. – https://doi.org/10.5194/nhess-22-3859-2022.

14 **Almubaidin, M. A. A., Ahmed, A. N., Sidek, L. B. M., Elshafie, A.** Using Metaheuristics Algorithms (MHAs) to Optimize Water Supply Operation in Reservoirs: A Review [Text] // In Archives of Computational Methods in Engineering. – 2022. – Vol. 29. – P. 3677–3711. – https://doi.org/10.1007/s11831-022-09716-9.

15 **Demirkıran Ada, E.** Artificial Intelligence Applications in Taxation Processes: The Digital Transformation of the Revenue Administration [Text] // In International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Research. – 2025. – Vol. 9. – P. 212–217. [Electronic resource] – Available at: https://as-proceeding.com/index.php/ijanser/article/view/2766 (Accessed 15.07.2025).

Received 16.07.26.
Received in revised form 20.07.26.
Accepted for publication 31.08.26.

**А. М. Аубакирова[1], А. В. Нефтисов[2], М. Н. Оразбай[3], А. А. Белощицкий[4], Т. А. Гончаренко[5]*
[1,3,4]Astana IT University,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[2]Academy of Physical Education and Mass Sports,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[4,5]Kyiv National University of Construction and Architecture,
Украина, Киев.
16.07.26 ж. баспаға түсті.
20.07.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

СУ ҚОЙМАЛАРЫНДАҒЫ СУ ЖИНАЛУ ДИНАМИКАСЫН БОЛЖАУҒА АРНАЛҒАН ДЕЛЬТА-ФАКТОРҒА НЕГІЗДЕЛГЕН XGBOOST МОДЕЛІН ӘЗІРЛЕУ

Су қоймаларының су көлемін дәл болжау климаттың өзгеруіне бейімделу, құрғақшылықтың салдарын азайту үшін өте маңызды және энергияны жоспарлау мен басқару үшін негіз болып табылады, әсіресе гидрологиялық өзгергіштік дәстүрлі модельдеуге қиындықтар туғызатын континенттік бассейндерде. Өз кезегінде, су қоймаларының ағынының азаюы оңтайлы гидроэлектростанцияларды өндіру үшін суды шектейді. Бұл мәселені шешу үшін біз судың жалпы көлемін емес, күнделікті көлемдік өсуді (ΔV) болжайтын экстремалды градиентті күшейтуді (XGBoost) қолданатын жаңа Дельта негізіндегі оқыту құрылымын ұсынамыз. Ұсынылған модель стандартты Машиналық оқыту тәсілдері судың абсолютті көлемі туралы деректердегі тұрақсыз трендтерге байланысты қысқа мерзімді динамиканы анықтауда жиі қиындықтарға тап болатын жағдайларда жаңа шешім болып табылады. Модель ERA5 реанализінің кешігуінің метеорологиялық және гидрологиялық сипаттамаларын біріктіреді,

2019-2022 жылдардағы деректерде оқытылады, 2023-2025 жылдардағы деректерде сыналады және аймақтық ерекшеліктерге бейімделеді. Нәтижелер ерекше өнімділікті көрсетеді: қалпына келтірілген көлем R^2 анықтау коэффициентіне 0,983, Нэш–Сатклифф тиімділік коэффициентіне (NSE) 0,983 және Клинг–Гупта тиімділік коэффициентіне (KGE) 0,984 жетті. Ең бастысы, дельта моделіне негізделген тәсіл трендтің жүйелі ағып кетуін тиімді жою арқылы көлемді тікелей болжаудың негізгі әдісімен салыстырғанда орташа квадраттық қатені (RMSE) 16 %-ға азайтты. Өнімділікті талдау су мен жауын-шашын интегралдарындағы кідірістердің физикалық артықшылығын растады. Бұл зерттеу дифференциалды динамиканы модельдеу қайталанатын және сенімді құралды ұсына отырып, болжамдардың тұрақтылығы мен интерпретациясын айтарлықтай арттыратынын растайды.

Кілтті сөздер: су қоймаларындағы су деңгейін болжау, дельта негізіндегі оқыту, гидрологиялық машиналық оқыту, XGBoost, ERA5 реанализі, көпкөкжиекті болжау, қашықтықтан зондтау, болжамды модельдеу.

**А. М. Аубакирова[1], А. В. Нефтисов[2], М. Н. Оразбай[3], А. А. Белощицкий[4], Т. А. Гончаренко[5]*
[1,3,4]Astana IT University,
Республика Казахстан, г. Астана;
[2]Academy of Physical Education and Mass Sports,
Республика Казахстан, г. Астана;
[4,5]Kyiv National University of Construction and Architecture,
Украина, Киев.
Поступило в редакцию 16.07.26.
Поступило с исправлениями 20.07.26.
Принято в печать 31.08.26.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ XGBOOST НА ОСНОВЕ ДЕЛЬТА-ФАКТОРА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ НАКОПЛЕНИЯ ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩАХ

Точное прогнозирование объемов воды в водохранилищах имеет решающее значение для адаптации к изменению климата, смягчения последствий засух и создает основу для энергетического планирования

и управления, особенно в континентальных бассейнах, где гидрологическая изменчивость создает проблемы для традиционного моделирования. В свою очередь уменьшение количества притока в водохранилищах ограничивает доступный объем воды для гидроэлектростанций, необходимый для оптимального режима работы выработки гидроэлектроэнергии. Для решения этой проблемы мы предлагаем новую структуру обучения на основе дельты с использованием экстремального градиентного бустинга (XGBoost), которая прогнозирует ежедневные приращения объема (ΔV), а не общий объем воды. Предложенная модель представляет собой новое решение в тех случаях, когда стандартные подходы машинного обучения часто испытывают трудности с выявлением краткосрочной динамики из-за нестационарных трендов в данных об абсолютном объеме воды. Модель интегрирует метеорологические и гидрологические характеристики задержки реанализа ERA5, обучена на данных за 2019–2022 годы, протестирована на данных за 2023–2025 годы и адаптирована к региональной специфике. Результаты демонстрируют исключительную производительность: реконструированный объем достиг коэффициента детерминации R^2 0,983, коэффициента эффективности Нэша–Сатклиффа (NSE) 0,983 и коэффициента эффективности Клинга–Гупты (KGE) 0,984. Что наиболее важно, подход, основанный на дельта-модели, снизил среднеквадратичную ошибку (RMSE) на 16 % по сравнению с базовым методом прямого прогнозирования объема, эффективно устранив систематическую утечку тренда. Анализ производительности подтвердил физическое превосходство задержек в интегралах объема воды и осадков. Это исследование подтверждает, что моделирование дифференциальной динамики значительно повышает стабильность и интерпретируемость прогнозов, предлагая воспроизводимый и надежный инструмент.

Ключевые слова: прогнозирование уровня воды в водохранилищах, обучение на основе дельты, гидрологическое машинное обучение, XGBoost, реанализ ERA5, многогоризонтное прогнозирование, дистанционное зондирование, прогностическое моделирование.

МРНТИ 44.31.31
https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/114-130

Г. Ә. Әкімбек[1], *М. А. Каримолданова[2], Б. К. Алияров[3], Г. У. Калкабаева[4]
[1]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана;
[2,3]Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы;
[4]ALT Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Республика Казахстан, г. Алматы.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7773-6479
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6762-7901
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8612-6779
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8311-5660
*e-mail: m.karimoldanova@aues.kz

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

В рамках данного исследования проводится анализ и оптимизация конструкции шаровой барабанной мельницы, применяемой на угольных электростанциях РК. Угольная энергетика Казахстана в значительной мере опирается на шаровые барабанные мельницы (ШБМ) для тонкого помола угля перед его сжиганием на тепловых электростанциях.

В статье представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований по повышению энергоэффективности шаровых барабанных мельниц (ШБМ) за счет оптимизации конструкции удержателей шаров. Были выявлены ключевые недостатки существующих конструкций: быстрый износ футеровки из-за интенсивного скольжения и ударов шаров, неравномерное измельчение угля, преобладание энергоёмкого истирания над ударным способом и длительное время загрузки-разгрузки материала. Рассмотрены недостатки существующих конструкций и предложены конструктивные решения, позволяющие снизить энергозатраты, увеличить производительность, сократить время загрузки/выгрузки и продлить срок службы футеровки.

Предложена новая конструкция невентилируемой универсальной мельницы. В ней предусмотрены три изогнутых держателя шаров, расположенных на равном расстоянии, люк по всей длине барабана с автоматическим ситом и задвижкой, а также классификатор под барабаном с магнитными уловителями. Такое решение позволяет поднимать шары на оптимальную высоту, существенно снижать скольжение и повышать эффективность ударного измельчения.

Экспериментальный ситовой анализ трёх марок казахстанского угля (Шубаркол, Каражыра и Экибастуз) подтвердил различия в измельчаемости материалов и позволил количественно оценить влияние высоты падения и диаметра шара на гранулометрический состав продукта.

Ключевые слова: шаровая мельница, энергопотребление, износостойкость футеровки, теплоэнергетика, износ, уголь, измельчение.

Введение

В Казахстане энергетический сектор традиционно базируется на угле, и угольные электростанции занимают значительную долю в структуре потребления энергии. В настоящее время 69 % всей электроэнергии в Казахстане вырабатывается на угольных станциях, общая установленная мощность которых приближается к 24 тыс. ГВт, при этом доступная мощность составляет почти 19 тыс. ГВт [1; 2].

В угольной энергетике измельчение дробленного угля до размеров, пригодных для факельного сжигания на угольных ТЭС (100 мкм и менее), достигается с применением трех основных типов мельниц:

– молотковые мельницы, в которых измельчение поступающего угля производится преимущественно (около 90 процентов) ударами, так называемых бил, изготавливаемых из специального металла с повышенной стойкостью к абразивному износу. Измельчение угля в этих типах мельниц происходит также истиранием (с существенно меньшей интенсивностью) в пространстве между соседними билами и между билами и корпусом мельницы;

– валковые мельницы, в которых измельчение угля производится раздавливанием (более 95 процентов) и истиранием в пространстве между валками и ограничителем перемещения угля, устанавливаемого на краю размольного стола;

– шаровые барабанные мельницы, в которых измельчение угля производится ударами шаров, падающих из верхней части барабана на

слой угля и шаров в нижней части барабана и частично - истиранием между шарами, находящимися в нижней части барабана и между шарами и поверхностью барабана.

Количество ТЭС, на которых установлены шаровые барабанные мельницы, существенно преобладают над числом ТЭС с молотковыми мельницами [3; 4].

Несмотря на широкое применение ШБМ, существуют проблемы, связанные с высоким износом футеровки и неравномерным распределением измельченного материала, что снижает общую производительность и увеличивает эксплуатационные расходы. В связи с этим исследование факторов, влияющих на режимы работы мельниц, а также разработка методов повышения их энергоэффективности представляют собой актуальную научно-практическую задачу.

Материалы и методы

Проведён анализ патентов на шаровые мельницы [5; 6; 7], который показал, что наличие сложных многоузловых механизмов затрудняет обслуживание, футеровка подвержена быстрому износу из-за интенсивных ударов шаров; время выгрузки материала ограничивает производительность, измельчение часто неравномерное из-за особенностей геометрии барабана. Известно, что измельчение угля в ШБМ (в идеальном случае) производится преимущественно за счет удара шаров, падающих с наивысшей точки периметра барабана, (находится на угле 180 градусов относительно нижней точки барабана). Для подъема шаров к этой точке, в ШБМ предусматриваются устройств, называемые удержателями шаров. В некоторых конструкциях удержатели представляют собой прямоугольник с высотой, близкой к значению двух диаметров используемых шаров. Опыты на модели шаровой барабанной мельницы показали, что шары из такого удержателя начинают высыпаться при углах поворота барабана на 40-50 градусов и соответственно, с уменьшенной кинетической энергией. Скатывающиеся шары несколько истирают поверхность барабана. Кроме того, при этой конструкции удержателя, вместе с шарами поднимается часть угля, которая будет измельчаться с существенно меньшей интенсивностью. В других конструкциях ШБМ для исключения абразивного износа (при скольжении угля и шаров по поверхности корпуса барабана) на внутреннюю сторону барабана устанавливаются броневые плиты, которые по своей геометрической форме образуют «волнообразные» удержатели шаров. Опыты на модели показали, что из этой конструкции удержателя шары высыпаются практически полностью при углах менее 40 градусов. Это означает, что основная масса шаров и измельчаемого угля будет

двигаться за счет скольжения по поверхности барабана. В результате, вместо эффективного измельчения ударами падающих шаров, уголь преимущественно измельчается энергоемким истиранием между шарами и между поверхностью барабана и шарами. В связи с этим предлагаем более совершенную конструкцию [8].

Для достижения технического результата установка представляет собой невентилируемую универсальную мельницу, предназначенную для измельчения твердых частиц средней фракции, включающее корпус барабана, который закреплен на двух подшипниковых опорах, люк для загрузки и выгрузки, держатели, шары, электродвигатель для вращения, который для улучшение процесса измельчения ввод твердых частиц и шаров осуществляется через разрез по всей длине барабана, а устройство ввода-вывода соединено с ситом с целью удержания шаров и крупных частиц внутри барабана во время процесса разгрузки. Также новизной такой конструкции является то, что под барабаном установлен классификатор для отбора нужной фракции. Кроме того, на внутреннем корпусе барабана закреплены три держателя с особенной конфигурацией, расположенные на равном расстоянии друг от друга. Головка держателя имеет изогнутую форму, предотвращая выпадение шаров, делая эту мельницу более эффективной, безопасной и экономически выгодной.

Устройство состоит из корпуса барабана 1, изготовленного из чугуна или стали, который опирается на подшипники 8. Внутри барабана предусмотрено броня 7 резиновыми плитами для защиты и улучшения износостойкости и уменьшения шума. Шары 5, предназначенные для измельчения материала, также изготовлены из тех же материалов (сталь или чугун) (рисунок 1) [9].

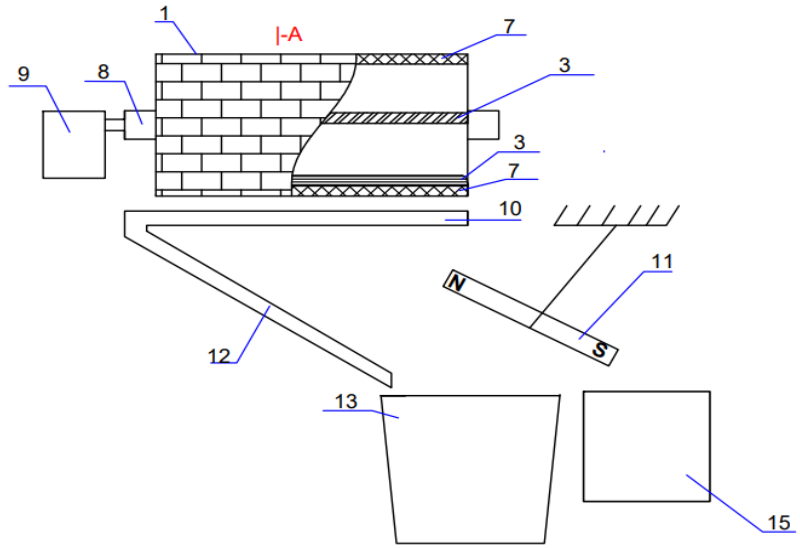
Люк 2, используемый для загрузки и выгрузки материала, жестко соединен с ситом 4, создавая единое устройство. Эффективность процессов управления обеспечивается удобством работы задвижки 14, которая осуществляет открывание и закрывание не только люка, но и сита 4. При поступлении твердых частиц в мельницу сито 4 автоматически открывается вместе с люком 2, обеспечивая плавный поток частиц внутрь мельницы. При выгрузке твердых частиц сито 4 остается в устье мельницы, где оно задерживает крупные частицы. Отличительной особенностью данного подхода является то, что футеровка мельницы проходит через отверстия сита. Это предотвращает износ сита и обеспечивает более эффективное управление процессом измельчения.

Люк 2, для сокращения времени ввода твердых частиц и шаров, автоматически раскрывается вдоль всего барабана, что значительно ускоряет процессы загрузки и выгрузки материала.

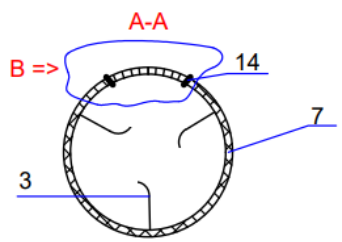
Футеровка (броня) 7 каждого ряда имеет отверстия на внешней стороне. К этой футеровке жестко присоединены три держателя 3, расположенные на равном расстоянии друг от друга. Каждый держатель 3 обладает особенной конфигурацией: головка держателя имеет изогнутую форму. Такая конструкция обеспечивает эффективное разделение шаров от твердых частиц в процессе работы устройства для точного удара. Кроме того, эти держатели 3 выполняют важную функцию защиты шаров 5, предотвращая их износ при взаимодействии друг с другом.

Для загрузки твердых частиц 6 и шаров 5 автоматически открываются и люк, и сито с использованием задвижки 14. После загрузки люк 2 закрывается. Барабан вращается с помощью двух соединенных подшипников 8 и электродвигателя 9. По завершении процесса для разгрузки открывается только люк 2, а через сито 4 происходит выход мелких частиц, сохраняя крупные частицы и шары 5 внутри барабана для последующей обработки.

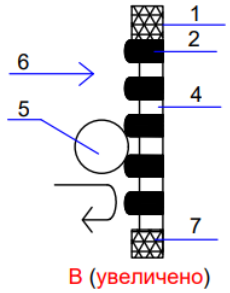
Находящийся ниже барабана классификатор 10 представляет собой важный этап обработки материала. После того как твердые частицы измельчаются до нужного размера, он направляется на классификатор 10 для последующей сортировки. Здесь происходит просеивание частиц, и те частицы, которые соответствуют требуемому стандарту, проходят через пластину 12 и направляются в бункер 13 для временного хранения. Тем временем частицы, не соответствующие заданным параметрам, возвращаются в барабан для повторной обработки. Для извлечения металлических частиц в участке между пластиной и бункером установлены магнитные уловители 11, которые эффективно захватывают и временно хранят уловленные металлические элементы в емкости 15. Готовый материал, прошедший все этапы обработки и классификации, направляется в бункер 13, где хранится в ожидании последующего использования [10].



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Невентилируемая шаровая барабанная мельница

Результаты и обсуждение

Влияние веса (размера) шаров. Из школьной геометрии известно, что объем шара по его диаметру определяется по формуле

$$V = (4/3)\pi R^{3}. \quad (1)$$

где R – радиус шара.

Из этой формулы видно, что уменьшение диаметра шара, даже до 0.9 от исходного размера, уменьшает его вес на 27 % от веса шара с исходным

размером. Уменьшение размера до 0.8 от исходного размера снижает вес шара почти на 50 % и соответственно уменьшение размера шара до 0.5, делает его вес совсем незначительным – 0.125 от исходного веса шара. С другой стороны, уменьшение размера шара уменьшает поверхность его воздействия на измельчаемый слой угля (в первой степени).

Очевидно, что при уменьшении диаметра шара уменьшается поверхность взаимодействия шара со слоем угля. В результате удельный вес шара, определяемый на единицу поверхности контакта шара с частицей угля определяется по формуле

$$\frac{V}{S} = \frac{(4/3)\pi R^3}{4\pi r^2}, \quad (2)$$

своего рода «приведенный» вес, увеличивается пропорционально первой степени уменьшения диаметра шара (можно предположить, что взаимодействует половина поверхности шара). Следует отметить, что именно сила этого взаимодействия определяет интенсивность измельчения.

Наряду с ударом об слой угля, шары ударяют также по шарам, расположенными в нижней части барабана вместе с углем. Вероятность удара шаром об шар (в нижней части барабана), при равном количестве этих шаров, снижается по мере уменьшения его размера. Частицы измельчаемого угля в верхней части слоя значительно деформируют воздействие шаров на нижную часть слоя. Однако удар шаров об шары оказывает заметно меньшее отрицательное влияние т.к. упругость столкновения между шарами практически полная.

В шаровой мельнице вместе с процессом измельчения ударом шаров происходит измельчение истиранием между шарами и между шарами и с поверхностью барабана. Этот процесс зависит от площади поверхности шаров и соответственно интенсивность измельчения уменьшается при уменьшении размера шара в квадратичной зависимости.

В результате уменьшенные веса шара (в связи с уменьшением его размера) несколько снижает интенсивность процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице.

Опыты на прозрачной модели.

Для оценки эффективности устройства была изготовлена прозрачная модель барабана шаровой барабанной мельницы ШБМ ТЭЦ-3 АлЭС (тип Ш-10) в масштабе 1:5. Конструкция модели предусматривала разделение внутреннего объёма на две идентичные секции:

Первая оснащена традиционными устройствами для удержания шаров, выполненными в виде волнообразной поверхности футеровки.

Вторая секция оборудована удерживающим устройством оригинальной конструкции, предложенной в рамках данного исследования.

В ходе эксперимента проводились наблюдения за траекторией движения шаров и их взаимодействием с измельчаемым материалом. Для фиксации результатов использовалась видеосъёмка с последующим покадровым анализом. Отдельное внимание уделялось времени нахождения шаров в зоне активного измельчения, высоте их подъёма и характеру ударов по материалу.

Проведение эксперимента на прозрачной модели позволило наглядно продемонстрировать различия в поведении шаров при использовании различных конструкций удерживающих устройств, а также количественно оценить их влияние на эффективность измельчения (рисунок 2).

Рисунок 2 – Прозрачная модель ШБМ

Опыты на установке – емкость с угольными частицами

Разместить в емкости угольные частицы:

1.10 раз бросать с равной высоты шар (с заданным размером) на угольные частицы и провести ситовой анализ объема угольных частиц

2.10 раз бросать с разной (3) высоты шар с заданным размером на угольные частицы и провести ситовой анализ объема угольных частиц

3.10 раз бросать с разной высоты шар с другим (3) размером на угольные частицы и провести ситовой анализ объема угольных частиц

В каждом эксперименте ситовой анализ выполнялся по стандартной методике, включающей последовательное просеивание образца через набор сит с уменьшающимися размерами ячеек, определение массовой доли каждой фракции и построение кривых распределения по крупности (рисунок 3, 4).

Рисунок 3 – Труба (емкость),
используемые угольные частицы

Рисунок 4 – Лабораторные весы и сита

В результате определим влияния высоты падения шаров (влияние очевидное– мы устанавливаем количественную зависимость), влияния размера шара (влияние очевидное– мы устанавливаем количественную зависимость) (таблица 1).

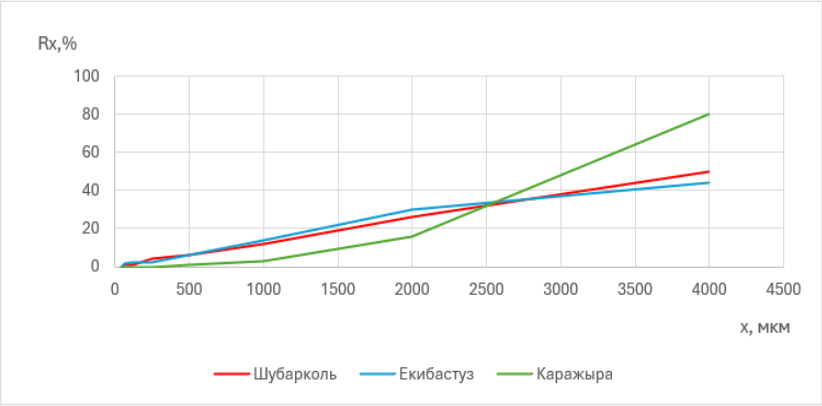
Таблица 1 – Результаты ситового анализа

размер Сита	4-10мм						2мм								1мм			
	1		2		3		1		2		3			1	2			3
мкм	г	%	г	%	г	%	г	%	г	%	г	%	г	%	г	%	г	%
45	0	0	0	0		0		0		0		0		0		0		0
63	0,5	1	0,8	1,6		0	1	2	0,5	1	1	2		0	1	2		0
125	0,5	1	1	2		0	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
250	2	4	1,2	2,4		0	2	4	1,5	3	0,5	1	3	6	2	4	2	4
500	3	6	3	6	0,5	1	4	8	4	8	1,5	3	10	20	11	22	4	8
1000	6	12	7	14	1,5	3	12	24	16	32	4	8	36	72	35	70	43	86
2000	13	26	15	30	8	16	30	60	27	54	42	84	-		-		-	
4000	25	50	22	44	40	80	-		-		-		-		-		-	

В эксперименте использовался стальной шар диаметром 40 мм, масса угля в образце – 50 г, высота падения –1 м. Каждый образец подвергался 10 ударам шара. Испытания проводились для трёх марок угля:1 – Шубаркол, 2 – Каражыра,3 – Экибастуз.

Результаты ситового анализа представлены в таблице 1 и на рисунке 5.

1. шар 40мм, размер угля - 4-10мм



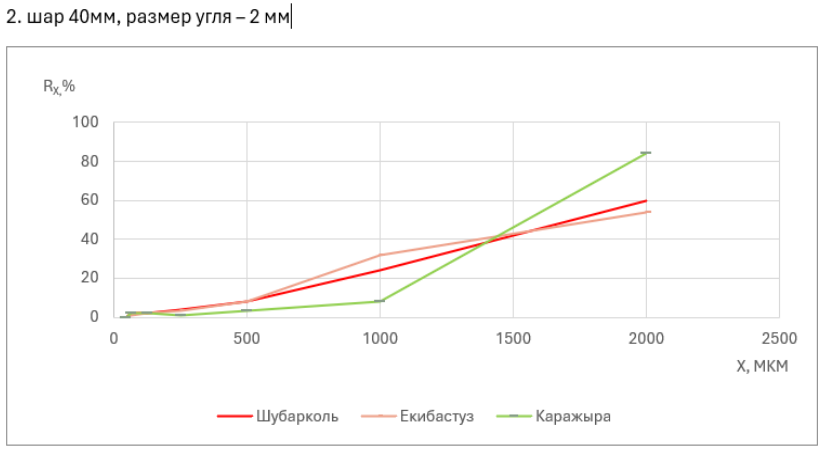


Рисунок 5 – Ситовый анализ различных марок угля.

Сравнение данных показывает, что уголь марки Шубаркол имеет наибольшую долю мелких фракций (<3 мм), что свидетельствует о более эффективном измельчении под воздействием удара шара. Уголь Каражыра и Экибастуз имеют более крупные фракции в остатке, что указывает на их большую прочность или меньшую хрупкость.

Реализация предлагаемых решений позволит снизить расход энергии на размол угля в шаровой мельнице на 20-25 процентов, что, с учетом сложившегося на ШБМ ТЭЦ -3 расхода энергии на размол и годового объема сжигаемого угля, может составить более 3 млн кВт часов в год. Если учитывать, что при получении 1 кВтчаса образуется примерно 1 кг CO_2, то АТЭЦ -3, за счет реализации этого решения, может снизить выбросы углекислого газа более чем на 3000 тонн в год. Это равноценно строительству объекта с мощностью более 400 кВт (со стоимостью строительства в 500 тысяч долларов США) без выбросов углекислого газа.

Предложенное устройство обладает простой конструкцией, экономичностью в производстве и не требует значительных материальных затрат. В процессе ремонта ввод твердых частиц и шаров по всей длине барабана значительно более удобно по сравнению с существующими мельницами. Это обусловлено тем, что в настоящее время твердые частицы извлекаются силой рук, что является опасным для здоровья и жизни человека, а также требует значительного времени для восстановления установки. Предложенная конструкция обеспечивает более безопасный и эффективный процесс ремонта.

Также установка представляет собой новизну в сравнении с действующими мельницами, поскольку в ней замена шаров может осуществляться без необходимости полной остановки установки. В отличие от существующих мельниц, где для подобных операций требуется прекращение процесса. Такой подход обеспечивает более непрерывную и эффективную работу, что может значительно повысить производительность и снизить время простоя оборудования.

Наличие держателей способствует точному направлению удерживающего шара прямо в твердую частицу, что защищает стенки мельницы от быстрого износа шаров. Такой подход также обеспечивает эффективную защиту стенок без необходимости использования дорогостоящих металлических материалов для изготовления брони. Такое улучшение делает предложенную установку более эффективной, долговечной и экономически выгодной по сравнению с традиционными мельницами.

В результате невентилируемая универсальная мельница для измельчения частиц средней фракции позволяет повысить производительность мельницы и снизить затраты электроэнергии на процесс.

Выводы

Очевидно, что создание уменьшенной модели ШБМ, в которой с достаточной достоверностью воспроизводится интенсивность измельчения угля практически невозможно. С другой стороны, на моделях создаваемых с соблюдением условий моделирования, можно изучать влияние отдельных параметров ШБМ с достаточной достоверностью. В частности, на прозрачной модели отработана оптимальная конструкция удержателя шаров и угля, которая обеспечивает наилучшие условия взаимодействия падающих шаров и слоя измельчаемого угля.

В ходе исследования рассмотрены основные направления совершенствования конструкции шаровой мельницы, направленные на снижение энергопотребления и повышение эффективности работы оборудования. Оптимизация параметров конструкции и использование износостойких материалов для футеровки позволяют существенно увеличить надежность и долговечность мельницы, что снижает эксплуатационные расходы и простой оборудования. Улучшение технологических процессов измельчения способствует повышению производительности и качеству помола топлива, что напрямую влияет на эффективность работы угольных электростанций. Внедрение предложенных решений будет способствовать повышению энергоэффективности предприятий теплоэнергетики в Казахстане и снижению негативного воздействия на окружающую среду.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Алияров, Б. К., Алиярова, М. Б.** Казахстан: энергетическая безопасность, энергетическая эффективность и устойчивость развития энергетики [Текст] // Алматы : Гылым, 2010. – 277 с.

2 **Левит, Г. Т.** Пылеприготовление на тепловых электростанциях [Текст] // М. : Энергоатомиздат, 1990. – 384 с.

3 **Akimbek, G. A., Aliyarov, B. K., Badaker, V. C., Akimbekova, S. A.** Methodology and experimental setup for the study of relative abrasiveness of bulk solids [Текст] // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, 2022, pp. 14–20

4 **Каримолданова, М. А., Әкімбек, Г. Ә., Алияров, Б. К., Коробков, М. С., Джакипова, К. Т.** Шаровая барабанная мельница для измельчения угля средней фракции [Текст] // Вестник КазАТК. – 2024. – Т. 133, № 4. – https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-133-4-468-480

5 Патент JP 3125250 B2. Method for manufacturing crushed sand using wet ball mill and wet ball mill [Текст] // 15.01.2001.

6 Патент CN 205613504 U. Ball mill screening plant [Текст] // 05.10.2016.

7 Патент RU 2035227 C1. Periodically running ball mill [Текст] // 20.05.1995.

8 **Каримолданова, М. А.,Әкімбек, Г. Ә., Алияров, Б. К., Жауыт, А., Кунакова, Г. У.** Силы, действующие при измельчении твердого материала в шаровой барабанной мельнице и их влияние на корпус мельницы [Текст] // Вестник КазАТК. – 2024. – Т. 135, № 6. – https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-135-6-439-449

9 Патент 2024/0392.1. Невентилируемая универсальная мельница для измельчения твердых частиц средней фракции [Текст] // 16.05.2024.

10 **Zixin, Y., Yuxing, P., Zhencai, Z., Zhangfa, Y., Tongqing, L.** Impact Load Behavior between Different Charge and Lifter in a Laboratory-Scale Mill [Text] // Materials. – 2017. – Vol. 10, No. 8. – Art. 882. – https://doi.org/10.3390/ma10080882

REFERENCES

1 **Aliyarov, B. K., Aliyarova, M. B.** Kazahstan: energeticheskaya bezopasnost', energeticheskaya effektivnost' i ustojchivost' razvitiya energetiki [Kazakhstan: energy security, energy efficiency and sustainable energy development] [Text] // Almaty : Gylym, 2010. – 277 p.

2 **Levit, G. T.** Pyleprigotovlenie na teplovyh elektrostanciyah [Pulverized fuel preparation at thermal power plants] [Tekst] // M. : Energoatomizdat, 1990. – 384 p.

3 **Akimbek, G. A., Aliyarov, B. K., Badaker, V. C., Akimbekova, S. A.** Methodology and experimental setup for the study of relative abrasiveness of bulk solids [Text] // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, 2022, pp. 14–20

4 **Karimoldanova, M. A., Әkimbek, G. Ә., Aliyarov, B. K., Korobkov, M. S., Dzhakipova, K. T.** Sharovaya barabannaya mel'nica dlya izmel'cheniya uglya srednej frakcii [Ball drum mill for medium-sized coal grinding] [Text] // Almaty : Vestnik KazATK – 2024. – T. 133, № 4. – https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-133-4-468-480

5 Patent JP 3125250 B2. Method for manufacturing crushed sand using wet ball mill and wet ball mill [Tekst] // 15.01.2001.

6 Patent CN 205613504 U. Ball mill screening plant [Tekst] // 05.10.2016.

7 Patent RU 2035227 C1. Periodically running ball mill [Tekst] // 20.05.1995.

8 **Karimoldanova, M. A., Akimbek, G. A., Aliyarov, B. K., Zhauyt , A., Kunakova, G. U.** Sily, dejstvuyushchie pri izmel'chenii tverdogo materiala v sharovoj barabannoj mel'nice i ih vliyanie na korpus mel'nicy [Forces acting during the grinding of solid material in a ball drum mill and their impact on the mill shell] [Tekst] // Vestnik KazATK. – 2024. – T. 135, № 6. – https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-135-6-439-449

9 Patent 2024/0392.1. Neventiliruemaya universal'naya mel'nica dlya izmel'cheniya tverdyh chastic srednej frakcii [Non-ventilated universal mill for grinding medium-sized solid particles] [Tekst] // 16.05.2024.

10 **Zixin, Y., Yuxing, P., Zhencai, Z., Zhangfa, Y., Tongqing, L.** Impact Load Behavior between Different Charge and Lifter in a Laboratory-Scale Mill [Text] // Materials. – 2017. – Vol. 10, No. 8. – Art. 882. – https://doi.org/10.3390/ma10080882

Поступило в редакцию 03.04.26.
Поступило с исправлениями 24.04.26.
Принято в печать 31.08.26.

*Г. Ә. Әкімбек[1], *М. А. Каримолданова[2], Б. К. Алияров[3], Г. У. Қалқабаева[4]*
[1]Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[2,3]Ғ. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[4]М. Тынышпаев атындағы АЛТ университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

03.04.26 ж. баспаға түсті.
24.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЭНЕРГИЯ ТИІМДІЛІГІН ЖӘНЕ ТОЗУҒА ТӨЗІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ҮШІН ШАРЛЫ ДИІРМЕННІҢ ҚҰРЫЛЫМЫН ЖЕТІЛДІРУ

Осы зерттеу аясында Қазақстан Республикасындағы көмір электр станцияларында қолданылатын шарлы барабанды диірменнің конструкциясына талдау жүргізіліп, оны оңтайландыру қарастырылады. Қазақстанның көмір энергетикасы көмірді жылу электр станцияларында жағу алдында ұсақ ұнтақтау үшін негізінен шарлы барабанды диірмендерге (ШБД) сүйенеді.

Мақалада шарлы барабанды диірмендердің (ШБД) энергия тиімділігін арттыру мақсатында шар ұстағыштардың конструкциясын оңтайландыру бойынша жүргізілген эксперименттік және теориялық зерттеулердің нәтижелері ұсынылған. Қолданыстағы конструкциялардың негізгі кемшіліктері анықталды: шарлардың қарқынды сырғуы мен соққылары салдарынан футеровканың тез тозуы, көмірдің біркелкі ұсақталмауы, соққылы әдіске қарағанда энергияны көп қажет ететін үйкеліс арқылы ұнтақтаудың басым болуы, сондай-ақ материалды тиеу және түсіру уақытының ұзақтығы.

Қолданыстағы конструкциялардың кемшіліктері қарастырылып, энергия шығындарын азайтуға, өнімділікті арттыруға, тиеу/түсіру уақытын қысқартуға және футеровканың қызмет ету мерзімін ұзартуға мүмкіндік беретін конструктивтік шешімдер ұсынылған.

Желдетілмейтін әмбебап диірменнің жаңа конструкциясы ұсынылды. Онда бірдей арақашықтықта орналасқан үш иілген шар ұстағыш, барабанның бүкіл ұзындығы бойымен автоматты елеуіш пен ысырмасы бар люк, сондай-ақ барабан астында магниттік ұстағыштары бар классификатор қарастырылған. Бұл шешім шарларды оңтайлы биіктікке көтеруге, сырғуды айтарлықтай азайтуға және соққылы ұсақтаудың тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Қазақстанның үш түрлі көмір маркасы (Шұбаркөл, Қаражыра және Екібастұз) бойынша жүргізілген эксперименттік елеуіштік талдау материалдардың ұсақталу қабілетіндегі айырмашылықтарды растады және шардың құлау биіктігі мен диаметрінің өнімнің гранулометриялық құрамына әсерін сандық тұрғыдан бағалауға мүмкіндік берді.

Кілтті сөздер: шарлы диірмен, энергия тұтыну, қаптаманың тозуға төзімділігі, жылу энергетикасы, тозу, көмір, ұнтақтау.

*G. A. Akimbek[1], *M. A. Karimoldanova[2], B. K. Aliyarov[3], G. U. Kalkabaeva[4]*
[1]L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[2,3]G. Daukeyev Almaty University of Power
Engineering and Telecommunications,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[4] Mukhamedzhan Tynyshpaev ALT University,
Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 03.04.26.
Received in revised form 24.04.26.
Accepted for publication 31.08.26.

IMPROVEMENT OF BALL MILL DESIGN TO ENHANCE ENERGY EFFICIENCY AND WEAR RESISTANCE

This study focuses on the analysis and optimization of the design of a ball drum mill used at coal-fired power plants in the Republic of Kazakhstan. The coal-based energy sector of Kazakhstan largely relies on ball drum mills (BDMs) for the fine grinding of coal prior to its combustion at thermal power plants.

The paper presents the results of experimental and theoretical studies aimed at improving the energy efficiency of ball drum mills (BDMs) through the optimization of ball holder design. Key drawbacks of existing designs were identified, including rapid liner wear caused by intensive sliding and impacts of the balls, non-uniform coal grinding, the predominance of energy-intensive attrition over impact grinding, and prolonged material loading and unloading times.

The shortcomings of existing designs are analyzed, and engineering solutions are proposed to reduce energy consumption, increase productivity, shorten loading/unloading time, and extend the service life of the liner.

A new design of a non-ventilated universal mill is proposed. It incorporates three curved ball holders arranged at equal distances,

a full-length drum hatch equipped with an automatic sieve and gate, as well as a classifier with magnetic separators located beneath the drum. This design enables lifting the balls to an optimal height, significantly reducing sliding, and enhancing the efficiency of impact grinding.

An experimental sieve analysis of three Kazakh coal grades (Shubarkol, Karazhyra, and Ekibastuz) confirmed differences in grindability and allowed for a quantitative assessment of the influence of ball drop height and diameter on the particle size distribution of the product.

Keywords: ball mill, energy consumption, lining wear resistance, thermal power engineering, wear, coal, grinding.

МРНТИ 44.29.33

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/131-145

А. С. Барукин[1], *А. Ж. Динмуханбетова[2], Б. Е. Машрапов[3], О. М. Талипов[4]

[1,2,3,4]Торайгыров университет,
Республика Казахстан, г. Павлодар.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5969-4030
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-4538-9672
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3018-4125
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8355-1769
*e-mail: ardi100909@mail.ru

ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ СХЕМЫ ОРУ-500 КВ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ МЕТОДОМ ДЕРЕВА ОТКАЗОВ

В статье рассматривается применение логико-вероятностного метода с использованием дерева отказов для оценки надёжности схем открытых распределительных устройств (ОРУ) атомных электрических станций (АЭС). В качестве объекта исследования выбрана схема ОРУ-500 кВ крупнейшей АЭС Индии – Куданкулам с двумя блоками по 1000 МВт. Цель работы – продемонстрировать эффективность метода дерева отказов при анализе влияния отказов отдельных элементов схемы ОРУ АЭС на потери генерируемой мощности. Описывается алгоритм построения дерева отказов, включающий в себя формализацию конечного события, описание промежуточных и первичных событий с применением функций алгебры логики. На примере пяти возможных видов повреждений были построены фрагменты деревьев отказов, что позволило проиллюстрировать вклад каждого элемента в общую надёжность схемы ОРУ и получить выражения для вычисления частоты потери генерируемой мощности и относительной длительности восстановления нормального режима. Установлено, что метод дерева отказов обеспечивает наглядное представление взаимосвязей между отказами отдельных элементов и состоянием всей схемы ОРУ АЭС, и может быть использован как дополнение к таблично-логическому методу при оценке надёжности таких схем.

Ключевые слова: надежность схем ОРУ, атомная электростанция, логико-вероятностный метод, дерево отказов, отказы элементов, генерируемая мощность, длительность восстановления.

Введение

Надёжность открытых распределительных устройств (ОРУ) является одним из ключевых факторов, определяющих устойчивость и безопасность работы электрических станций. Отказ любого элемента в схеме может приводить к частичной потере выдачи мощности, нарушению режима работы энергоблоков и, как следствие, к недоотпуску электроэнергии потребителям. Поэтому оценка надёжности схем ОРУ остаётся одной из приоритетных задач при проектировании и эксплуатации электростанций.

На практике для таких расчётов широко используется таблично-логический метод [1; 2; 3], позволяющий определить величину аварийного недоотпуска электроэнергии и выявить наиболее уязвимые элементы схемы. Однако он не отражает структуру взаимосвязей между отказами и не показывает, какие комбинации событий приводят к потере работоспособности всей схемы [4]. Для более детального анализа требуется метод, который одновременно учитывает вероятности отказов и их логические зависимости.

Одним из наиболее универсальных методов для решения такой задачи является метод дерева отказов [5; 6; 7], относящийся к логико-вероятностным методам. Он основан на построении причинно-следственных связей между исходными событиями (отказами элементов) и конечными событиями, такими как потеря выдачи мощности или отключение блока. Метод позволяет в аналитической форме получить выражения для частоты возникновения отказов и длительности восстановления нормального режима, а также визуализировать влияние отдельных элементов на надёжность всей схемы ОРУ. Применение дерева отказов особенно целесообразно для анализа схем ОРУ атомных электростанций (АЭС), где высокие требования к отказоустойчивости делают необходимым детальный вероятностный подход.

Учитывая строительство первой АЭС в Республике Казахстан компанией «Росатом», был проведён анализ реализованных ею проектов в различных странах. Среди них выделяется схема ОРУ-500 кВ АЭС Куданкулам (Индия) с двумя блока мощностью по 1000 МВт, как типовая и технологически наиболее близкая к той, что вероятнее всего будет применена при сооружении отечественной АЭС. В связи с этим именно данная схема выбрана в качестве объекта исследования для оценки её надёжности.

Цель исследования – оценить эффективность метода дерева отказов при анализе надёжности схемы ОРУ АЭС и показать возможность его применения для определения показателей частоты потери генерируемой мощности и длительности восстановления нормального режима.

Материалы и методы

При анализе события, которое вызывает отказ элемента схемы ОРУ, строится дерево отказов. Построение такого дерева позволяет легко воспроизводить алгоритмы для определения вероятности отказа элемента схемы. Для этого используются логические связи «И» (произведение), «ИЛИ» (сумма) и символы событий [8]. Дерево отказов описывает причины появления рассматриваемого вида отказа элемента схемы, т.е. конечное событие. Последнее обозначают прямоугольником с двойной рамкой. Промежуточное событие (сложное высказывание) – прямоугольником, а первичное элементарное событие (простое высказывание) – кругом. Первичные события обозначаются малыми прописными буквами, а промежуточные – строчными большими. Первичные события не могут быть ни как логические суммы «ИЛИ», ни как логические произведения «И» других событий и состояний.

Путь построения дерева отказов производится сверху вниз от конечного события через промежуточные к исходным событиям и состояниям, до тех пор, пока на всех уровнях дерева не останутся одни элементарные события и состояния. Последние обозначаются латинскими буквами. В качестве первичных событий учитывается следующее: y_i – отказ i-го элемента схемы; $\tilde{y}_j$– состояние простоя j-го элемента схемы; $x_{o.c.}$ – отказ срабатывания выключателя (о.в. – отказ включения, о.о. – отказ отключения). Повреждения могут быть кратковременными (о.п.) на время оперативных переключений и длительными (в.р.) на время ремонта.

Функция отказа представляется следующим выражением:

$$\tilde{Y}(u) = \bigcup_k S_k = \bigcup_i y_i \bigcup_j (y_j \wedge x_{o.c.j}) \bigcup_{ji} (y_i \wedge \tilde{y}_j) \bigcup_{ji} (y_i \wedge \tilde{y}_j) \bigcup_{ijk} (\tilde{y}_i \wedge y_j \wedge x_{o.c.k}). \quad (1)$$

Переход от логических функций к выражениям для расчета показателей надежности выполняется следующими заменами: логические знаки $\wedge$ и $\bigcap$ заменяются на $\times$, $\vee$ и $\bigcup$– на +, символы событий и состояний y – частотами $\lambda(y)$, – вероятностями $q(\tilde{y}) = \lambda(y)\tau(\tilde{y})$, соответственно, а $x_{o.c.}$ – условными вероятностями $Q(x_{o.c.})$. После преобразования функции отказа (1) выражения оценки частоты потери генерируемой мощности и относительной длительности ее восстановления имеют вид:

$$\Lambda(u) = \sum_{i} \lambda(y_i) + \sum_{k} \lambda(y_k) \cdot Q(x_{o.c..k}) + \sum_{i,j} \lambda(y_i) \cdot q(\tilde{y}_j) + \sum_{j,i} \lambda(y_j) \cdot q(\tilde{y}_i), \quad (2)$$

$$q(u) = \sum_{i} \lambda(y_i)\tau(y_i) + \sum_{k} \lambda(y_k) \cdot Q(x_{o.c.k})\tau(y_k \wedge x_{o.c.k}) + \sum_{i,j} \lambda(y_i) \cdot q(\tilde{y}_j)\tau(y_i \wedge \tilde{y}_j) + \sum_{j,i} \lambda(y_i) \cdot q(\tilde{y}_i)\tau(y_j \wedge \tilde{y}_j), \quad (3)$$

где $\tau(y_k \wedge x_{o.c.k})$ и $\tau(y_i \wedge \tilde{y}_j)$ среднее время восстановления работы схемы при отказе в отключении повреждения на присоединении и при совпадении повреждения одной цепи с аварийным простоем другой цепи, соответственно.

Далее будет выполнено построение дерева отказов некоторых возможных аварий в схеме ОРУ-500 кВ АЭС Куданкулам (рисунок 1) для оценки её надежности.

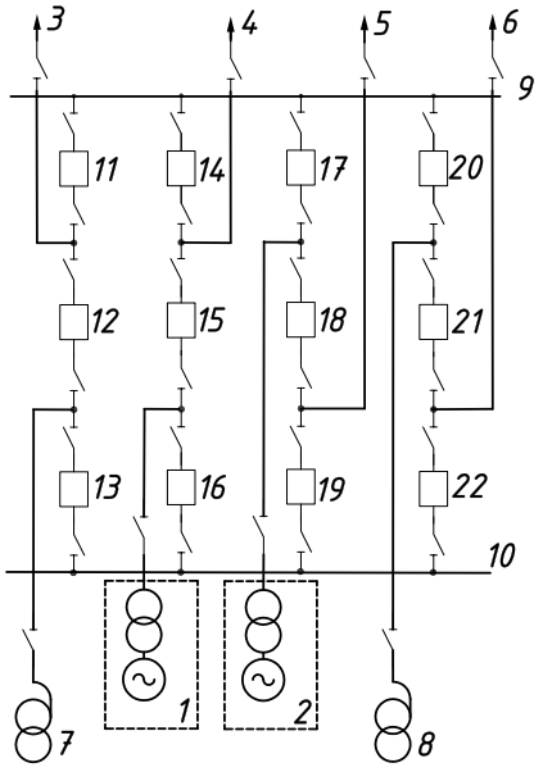


Рисунок 1 – Схема ОРУ-500 кВ АЭС Куданкулам

По изложенной выше методике для каждого вида повреждения строится свое дерево отказов. Исходными данными для расчета показателей надежности являются средние значения $\lambda(y)$, $\tau(\tilde{y})$ и $Q(x_{o.c.})$ для элементов схемы ОРУ-500 кВ, которые взяты из [9; 10] и представлены в таблицах 1 и 2. В таблице 2 первые значения соответствуют отказам выключателей в цепях линий (наибольшее значение), а вторые значения – в других цепях.

Таблица 1 – Показатели надежности элементов схемы

Элементы схемы			Частота отказа λ, 1/год	Длительность восстановления τ, $\times 10^{-3}$	Вероятность состояния $\tilde{q}$, $\times 10^{-3}$ о.е.
Код	№ на схеме	Наименование			
g	1, 2	Блок генератор-трансформатор	0,5	22,83	82,19
w	3-6	Линия электропередач	1,2	1,94	12,32
a	7, 8	Автотрансформатор	0,072	1,14	6,84
s	9, 10	Сборная шина	0,004	2,87	11,5
b	11-22	Выключатель элегазовый	0,14	5,51	8,33

Таблица 2 – Отказы выключателей

Код	Описание	Условная вероятность, $Q(x_{o.c.})$, $\times 10^{-3}$ о.е.
$b_{o.o.}$	Отказ выключателя в отключении КЗ	43,54/17,65
$b_{o.в.}$	Отказ выключателя во включении при АПВ	4,46/1,79

В рассматриваемой схеме возможны следующие режимы работы: $\tilde{q}_0$ нормальный режим без ремонтов; $\tilde{q}_1$ и $\tilde{q}_2$ и плановый и аварийный ремонты блоков генератор-трансформатор 1 и 2; $\tilde{q}_3$ и $\tilde{q}_4$ – плановый и аварийный ремонты линий 3 и 6 ($\tilde{q}_5$ и $\tilde{q}_6$ – аналогично для линий 4 и 5); $\tilde{q}_7$ и $\tilde{q}_8$ плановый и аварийный ремонты автотрансформаторов 7 и 8; $\tilde{q}_9$ и $\tilde{q}_{10}$ – плановый и аварийный ремонты шин 9 и 10; $\tilde{q}_{11}$, $\tilde{q}_{14}$, $\tilde{q}_{15}$, $\tilde{q}_{18}$ – аварийные ремонты выключателей 11, 13, 14, 16; $\tilde{q}_{12}$ $\tilde{q}_{13}$, $\tilde{q}_{16}$, $\tilde{q}_{17}$ – плановый и аварийный ремонты выключателей 12, 21, 15 и 18, соответственно. Вероятности состояний: $\tilde{q}_{j.пл} = \tilde{q}_{пл,i}$; $\tilde{q}_{j,ав} = \lambda_i \tau_i$; $\tilde{q}_{j0} = 1 - \sum_{i=1}^{m} \tilde{q}_j$. Деревья отказов для пяти возможных видов повреждений (конечных событий) из-за отказов

элементов рассматриваемой схемы приведены на рисунках 2-6. Для каждого из событий в числителе указаны кратковременные потери мощности, в знаменателе – длительные (прочерк – отсутствие потерь). Расчетные аварии зашифрованы как КЗБЛ – короткое замыкание (КЗ) на блоке, ОВ – отказ выключателя и т.д.

На основе (2) и (3) и рисунков 2-6, частоты потери генерируемой мощности и относительные длительности их восстановления для рассматриваемых пяти видов повреждений определяются по следующим формулам:

$$\Lambda(-/1Г) = \tilde{q}_0\, 2\lambda(g) + 2(\tilde{q}_3 + \tilde{q}_5)2\lambda(g) + 2(\tilde{q}_4 + \tilde{q}_6)2\lambda(g) + 2(\tilde{q}_7 + \tilde{q}_8)2\lambda(g) + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})2\lambda(g) + 2(\tilde{q}_{11} + \tilde{q}_{12})2\lambda(g) + 2(\tilde{q}_{13} + \tilde{q}_{14})2\lambda(g) + 2(q_{16} + q_{17})(2\lambda(g) + \lambda(b) + \lambda(s)) + 2(q_{15} + \tilde{q}_{18}) \cdot 2 \cdot \lambda(g),$$

$$q(-/1Г) = \tilde{q}_0\, 2\lambda(g)\tau(g) + 2(\tilde{q}_3 + \tilde{q}_5)2\lambda(g)\tau(g) + 2 \cdot (\tilde{q}_4 + \tilde{q}_6) \cdot 2 \cdot \lambda(g)\tau(g) + 2 \cdot (\tilde{q}_7 + \tilde{q}_8)2\lambda(g)\tau(g) + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})2\lambda(g)\tau(g) + 2(\tilde{q}_{11} + \tilde{q}_{12})2\lambda(g)\tau(g) + 2(\tilde{q}_{13} + \tilde{q}_{14})2\lambda(g)\tau(g) + 2(\tilde{q}_{16} + \tilde{q}_{17})(2\lambda(g)\tau(g) + \lambda(b)\tau(b) + \lambda(s)\tau(s)) + 2(\tilde{q}_{15} + \tilde{q}_{18})2\lambda(g)\tau(g)$$

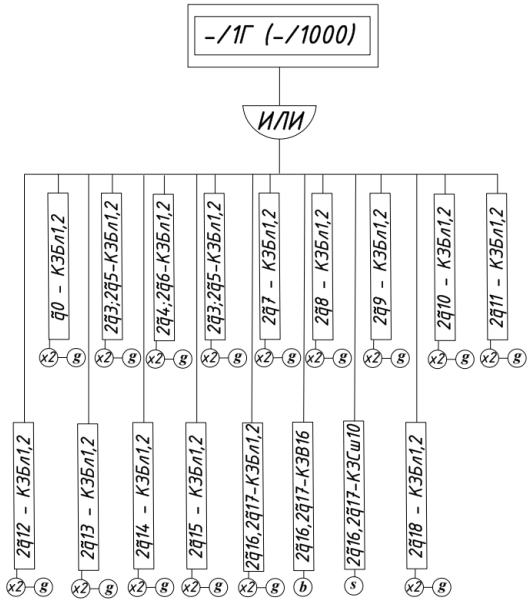


Рисунок 2 – Первое дерево отказов

$$\Lambda(1Г1Л / 1Г) = \tilde{q}_0\, 2Q(b_{o\cdot o})(\lambda(g) + \lambda(b)) + 2(\tilde{q}_3 + \tilde{q}_4)2Q(b_{o\cdot o})\lambda(g) + 2(\tilde{q}_5 + \tilde{q}_6)2Q(b_{o\cdot o})\lambda(g) + 2(\tilde{q}_7 + \cdot\tilde{q}_8)2Q(b_{o\cdot o})\lambda(g) + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{o\cdot o})(\lambda(g) + \lambda(w)) + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{o\cdot o})\lambda(w) + 2(\tilde{q}_{12} + \tilde{q}_{13})2Q(b_{o\cdot o})(\lambda(g) + \lambda(g)) + 2\tilde{q}_{15}\lambda(g) + 2\tilde{q}_{15}Q(b_{o\cdot o})(\lambda(g) + \lambda(b)) + 2(\tilde{q}_{16} + \tilde{q}_{17})2Q(b_{o\cdot o})(\lambda(g) + 2\lambda(b)) + 2\tilde{q}_{18}\lambda(b) + 2\tilde{q}_{18}2Q(b_{o\cdot o})(\lambda(g) + \lambda(w)) + 2\tilde{q}_{18}Q(b_{o\cdot v})\lambda(w),$$

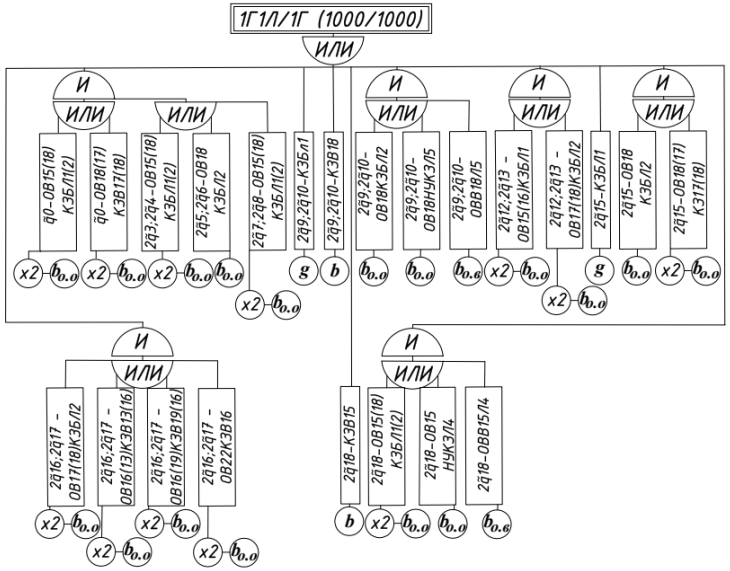


Рисунок 3 – Второе дерево отказов

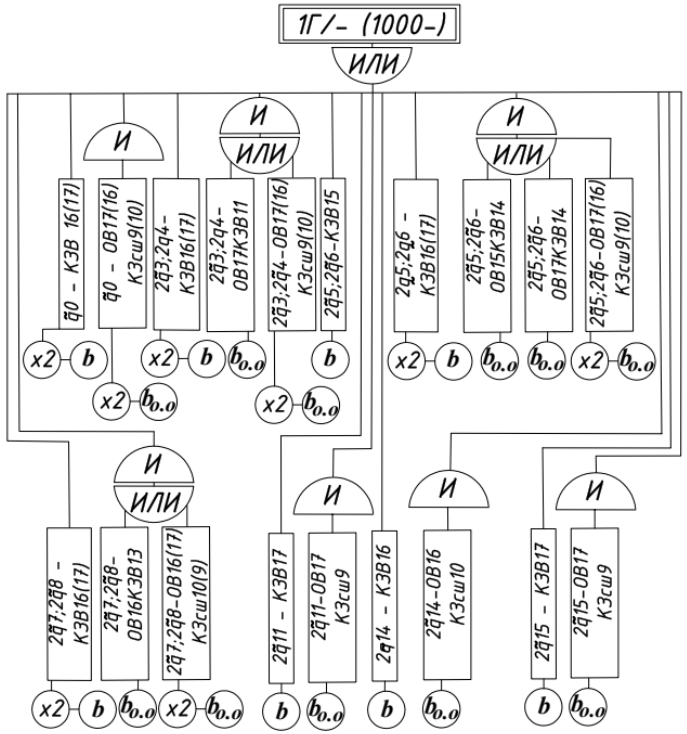


Рисунок 4 – Третье дерево отказов

$$q(1Г1Л / 1Г) = \tilde{q}_0\, 2Q(b_{o\cdot o})(\lambda(g)\tau(g) + \lambda(b)\tau(b)) + 2(\tilde{q}_3 + \tilde{q}_4)2Q(b_{o\cdot o})\lambda(g)\tau(g) +$$
$$+ 2(\tilde{q}_5 + \tilde{q}_6)2Q(b_{o\cdot o})\lambda(g)\tau(g) + 2(\tilde{q}_7 + \cdot\tilde{q}_8)2Q(b_{o\cdot o})\lambda(g)\tau(g) +$$
$$+ 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{o\cdot o})(\lambda(g)\tau(g) + \lambda(w)\tau(w)) + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{o\cdot o})\lambda(w)\tau(w) +$$
$$+ 2(\tilde{q}_{12} + \tilde{q}_{13})2Q(b_{o\cdot o})(\lambda(g)\tau(g) + \lambda(g)\tau(g)) + 2\tilde{q}_{15}\lambda(g)\tau(g) +$$
$$+ 2\tilde{q}_{15}Q(b_{o\cdot o})(\lambda(g)\tau(g) + \lambda(b)\tau(b)) + 2(\tilde{q}_{16} + \tilde{q}_{17})2Q(b_{o\cdot o})(\lambda(g)\tau(g) + 2\lambda(b)\tau(b)) +$$
$$+ 2\tilde{q}_{18}\lambda(b)\tau(b) + 2\tilde{q}_{18}2Q(b_{o\cdot o})(\lambda(g)\tau(g) + \lambda(w)\tau(w)) + 2\tilde{q}_{18}Q(b_{o\cdot v})\lambda(w)\tau(w),$$

$$\Lambda(1Г / -) = \tilde{q}_0\, 2\lambda(b) + \tilde{q}_0\, 2Q(b_{o\cdot o})\lambda(s) + 2(\tilde{q}_3 + \tilde{q}_4)2\lambda(b) +$$
$$+ 2(\tilde{q}_3 + \tilde{q}_4)2Q(b_{o\cdot o})(\lambda(b) + \lambda(s)) + 2(\tilde{q}_5 + \tilde{q}_6)2\lambda(b) +$$
$$+ 2(\tilde{q}_5 + \tilde{q}_6)Q(b_{o\cdot o})2(\lambda(b) + \lambda(s)) + 2(\tilde{q}_7 + \tilde{q}_8)2\lambda(b) +$$
$$+ 2(\tilde{q}_7 + \tilde{q}_8)Q(b_{o\cdot o})(\lambda(b) + 2\lambda(s)) + 2\tilde{q}_{11}\lambda(b) + 2\tilde{q}_{11}Q(b_{o\cdot o})\lambda(s) +$$
$$+ 2\tilde{q}_{14}\lambda(b) + 2\tilde{q}_{14}Q(b_{o\cdot o})\lambda(s) + 2\tilde{q}_{15}\lambda(b) + 2\tilde{q}_{15}Q(b_{o\cdot o})\lambda(s),$$

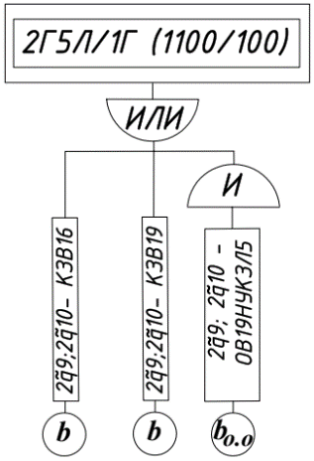


Рисунок 5 – Четвёртое дерево отказов

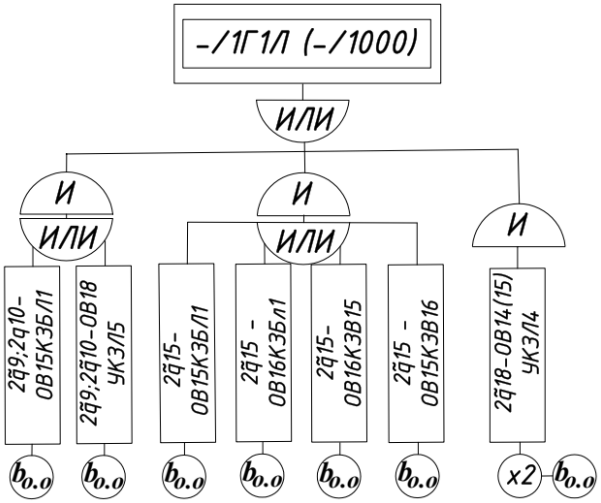


Рисунок 6 – Пятое дерево отказов

$$q(1Г / -) = \tilde{q}_0\, 2\lambda(b)\tau(b) + \tilde{q}_0\, 2Q(b_{o\cdot o})\lambda(s)\tau(s) + 2(\tilde{q}_3 + \tilde{q}_4)2\lambda(b)\tau(b) +$$
$$+ 2(\tilde{q}_3 + \tilde{q}_4)2Q(b_{o\cdot o})(\lambda(b)\tau(b) + \lambda(s)\tau(s)) + 2(\tilde{q}_5 + \tilde{q}_6)2\lambda(b)\tau(b) +$$
$$+ 2(\tilde{q}_5 + \tilde{q}_6)Q(b_{o\cdot o})2(\lambda(b)\tau(b) + \lambda(s)\tau(s)) + 2(\tilde{q}_7 + \tilde{q}_8)2\lambda(b)\tau(b) +$$
$$+ 2(\tilde{q}_7 + \tilde{q}_8)Q(b_{o\cdot o})(\lambda(b)\tau(b) + 2\lambda(s)\tau(s)) + 2\tilde{q}_{11}\lambda(b)\tau(b) +$$
$$+ 2\tilde{q}_{11}Q(b_{o\cdot o})\lambda(s)\tau(s) + 2\tilde{q}_{14}\lambda(b)\tau(b) + 2\tilde{q}_{14}Q(b_{o\cdot o})\lambda(s)\tau(s) +$$
$$+ 2\tilde{q}_{15}\lambda(b)\tau(b) + 2\tilde{q}_{15}Q(b_{o\cdot o})\lambda(s)\tau(s),$$

$$\Lambda(2Г5Л / 1Г) = 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})\lambda(b) + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})\lambda(b) +$$
$$+ 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{o\cdot o})\lambda(w),$$

$$q(2Г5Л / 1Г) = 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})\lambda(b)\tau(b) + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})\lambda(b)\tau(b) +$$
$$+ 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{o\cdot o})\lambda(w)\tau(w),$$
$$\Lambda(- / 1Г1Л) = 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{v\cdot o})\lambda(g) + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{v\cdot o})\lambda(w) +$$
$$+ 2\tilde{q}_{15}Q(b_{v\cdot o})(2\lambda(g) + 2\lambda(b)) + 2\tilde{q}_{18}Q(b_{v\cdot o})\lambda(w),$$

$$q(- / 1Г1Л) = 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{v\cdot o})\lambda(g)\tau(g) + 2(\tilde{q}_9 + \tilde{q}_{10})Q(b_{v\cdot o})\lambda(w)\tau(w) +$$
$$+ 2\tilde{q}_{15}Q(b_{v\cdot o})(2\lambda(g)\tau(g) + 2\lambda(b)\tau(b)) + 2\tilde{q}_{18}Q(b_{v\cdot o})\lambda(w)\tau(w).$$

Всего в рассматриваемой схеме ОРУ (рисунок 1) возможно возникновение 30 видов аварий. Пять из них рассмотрены выше. Для остальных 25 деревья отказов строятся аналогично.

Результаты и обсуждение

В таблице 3 представлены результаты оценки надежности рассматриваемой схемы ОРУ с использованием метода дерева отказов. Установлено, что на долю пяти рассмотренных видов аварий приходится 89,6% от суммарного аварийного недоотпуска электроэнергии, а длительность восстановления варьируется от 1,5 до 210 часов.

Полученные результаты показывают, что метод дерева отказов позволяет не только количественно оценить надёжность схемы, но и выявить структуру взаимосвязей между отказами её элементов. Высокая доля пяти анализируемых видов аварий в суммарном аварийном недоотпуске электроэнергии подтверждает корректность выбранных сценариев и отражает реальные закономерности функционирования схемы ОРУ.

Таблица 3 – Результаты расчета

Код аварии	Частота аварии Λ, 10^{-3} 1/год	Теряемая мощность, МВт		Аварийный недоотпуск электроэнергии W, кВт·ч/год 10^6
		ΔРо.п.	ΔРв.р.	
-/1Г	801	-	1000	168
1Г1Л/1Г	47	1000	1000	9
1Г/-	1	-	1000	0,14
2Г5Л/1Г	58	1000	-	0,09
-/1Г1Л	4	1100	100	0,02
…..	……	….	….	….
Итого:				197

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP26199335).

Выводы

Проведённое исследование показало возможность эффективного применения метода дерева отказов для оценки надёжности схем ОРУ атомных электростанций. На примере схемы ОРУ-500 кВ АЭС Куданкулам выполнена количественная оценка влияния отказов элементов на потери генерируемой мощности и длительность восстановления нормального режима. Совокупность пяти характерных видов аварий определяет около 90% суммарного аварийного недоотпуска электроэнергии, что подтверждает репрезентативность выбранных в статье сценариев. Использование метода дерева отказов позволило определить наиболее уязвимые элементы схемы и обосновать целесообразность его применения на этапе проектирования и анализа надёжности схем ОРУ атомных электростанций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Клецель, М. Я., Барукин, А. С., Динмуханбетова, А. Ж, Әмірбек Д. Ә.** Влияние надежности элементов кольцевых схем электрических станций на недоотпуск электроэнергии. // Вестник Торайгыров университет. Энергетическая серия, 2022. –№1. – С. 99–110. – https://doi.org/10.48081/OQFL4909

2 **Барукин, А. С., Клецель, М. Я., Динмуханбетова, А. Ж, Әмірбек Д. Ә.** Ввод дополнительного выключателя в блок генератор-

трансформатор для энергосбережения в схемах ОРУ электростанций // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ, 2023. – Т. 66, № 4. – С. 333-343. – https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-333-343

3 **Dinmukhanbetova, A.** Reduction of Energy Underdelivery at Nuclear Power Plants by Enhancing the Reliability of 3/2 Schemes // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM, 2025. – P. 327-332. https://doi.org/10.1109/ICIEAM65163.2025.11028469

4 **Kletsel, M. Ya., Barukin, A. S., Dinmukhanbetova, A. Zh.** Analysis of the methods for assessing the reliability of schemes of outdoor switchgears of electrical stations and substations // XIX Сатпаевские чтения: материалы междунар. конф. молодых ученых, магистрантов, студентов и школьников. – Павлодар : ПГУ им. С. Торайгырова, 2019. – С. 71–74.

5 **Volkanovski, A., Čepin, M., Mavko, B.** Application of the fault tree analysis for assessment of power system reliability // Reliability Engineering & System Safety, 2009. – Т. 94, № 6. – P. 1116–1127.

6 **Rahman, F. A.** Application of fault tree analysis for customer reliability assessment of a distribution power system // Reliability Engineering & System Safety, 2013. – Т. 111. – P. 76–85.

7 **Mamdikar, M. R., Kumar, V., Singh, P.** Dynamic reliability analysis framework using fault tree and dynamic Bayesian network: A case study of NPP // Nuclear Engineering and Technology, 2022. – Т. 54, №. 4. – P. 1213–1220. – https://doi.org/10.1016/j.net.2021.09.038

8 **Гук, Ю. Б.** Теория надежности в электроэнергетике. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.

9 **Балаков, Ю. Н., Мисриханов, М. Ш., Шунтов, А. В.** Проектирование схем электроустановок. Электронный ресурс : учебное пособие для вузов. – М. : Издательский дом МЭИ, 2016. – 288 с.

10 **Абдурахманов, А. М., Мисриханов, М. Ш., Федоров, В. Е., Шунтов, А. В.** О надежности ячеек элегазовых выключателей 110-750 кВ подстанций // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып 61. Проблемы исследования и обеспечение надежности систем энергетики – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2011. – С. 93–97.

REFERENCES

1 **Kletsel, M. Ya, Barukin, A. S., Dinmukhanbetova, A. Zh., Amirbek, D. A.** Vliianie nadezhnosti elementov kol'tsevykh skhem elektricheskikh stantsii na nedootpusk elektroenergii [Influence of the reliability of ring circuit elements at power plants on the energy not supplied] // Bulletin of

Toraighyrov University. Series: Energetics, 2022. – No. 1. – P. 99–110. – https://doi.org/10.48081/OQFL4909

2 **Barukin, A. S., Kletsel, M. Ya, Dinmukhanbetova, A. Zh., Amirbek, D. A.** Vvod dopolnitel'nogo vykliuchatelia v blok generator-transformator dlia energosberezheniia v skhemakh ORU elektrostantsii [Introduction of an auxiliary breaker into the generator-transformer block for energy saving in open switchgear circuits of power plants] // Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. – vol. 66, No. 4. – P. 333–343. – https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-333-343

3 **Dinmukhanbetova, A.** Reduction of Energy Underdelivery at Nuclear Power Plants by Enhancing the Reliability of 3/2 Schemes // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM, 2025. – P. 327–332. – https://doi.org/10.1109/ICIEAM65163.2025.11028469

4 **Kletsel, M.Ya., Barukin, A.S., Dinmukhanbetova, A.Zh.** Analysis of the methods for assessing the reliability of schemes of outdoor switchgears of electrical stations and substations // XIX Satpaevskie chteniya: materialy mezhdunar. konf. molodykh uchenykh, magistrantov, studentov i shkol□nikov [XIX Satpayev Readings: Proceedings of the International Conference of Young Scientists, Master's Students, Students and Schoolchildren]. – Pavlodar : S. Toraighyrov Pavlodar State University, 2019. – P. 71–74.

5 **Volkanovski, A., Čepin, M., Mavko, B.** Application of the fault tree analysis for assessment of power system reliability // Reliability Engineering & System Safety, 2009. – T. 94, № 6. – P. 1116–1127.

6 **Rahman, F. A.** Application of fault tree analysis for customer reliability assessment of a distribution power system // Reliability Engineering & System Safety, 2013. – T. 111. – P. 76–85.

7 **Mamdikar, M. R., Kumar, V., Singh, P.** Dynamic reliability analysis framework using fault tree and dynamic Bayesian network: A case study of NPP // Nuclear Engineering and Technology, 2022. – T. 54, №. 4. – P. 1213–1220. https://doi.org/10.1016/j.net.2021.09.038

8 **Guk, Yu. B.** Teoriya nadezhnosti v elektroenergetike [Theory of reliability in electric power engineering]. – L. : Energoatomizdat, 1990. – 208 p.

9 **Balakov, Yu. N., Misrikhanov, M. S., Shunts, A. V.** Proektirovanie shem elektroustanovok : uchebnoe posobie dlja vuzov [Designing of electrical circuits : textbook for universities]. – M. : Publishing house MPEI, 2016. – 288 p.

10 **Abdurakhmanov, A. M., Misrikhanov, M. Sh., Fedorov, V. E., Shuntov, A. V.** O nadezhnosti jacheek elegazovyh vykljuchatelej 110-750 kV podstantsij. Metodicheskie voprosy issledovanija nadezhnosti bol'shih system energetiki. Vyp 61. Problemy issledovanija i obespechenie nadezhnosti system

energetiki [On the reliability of the cells of gas switches 110-750 kV substations. Methodological issues of reliability research of large energy systems. Issue 61. Problems of research and ensuring the reliability energy systems] – Irkutsk: ISEM SO RAN, 2011. P. 93–97.

Поступило в редакцию 31.10.25.
Поступило с исправлениями 17.11.25.
Принято в печать 31.08.26.

*А. С. Барукин[1], *А. Ж. Динмуханбетова[2], Б. Е. Машрапов[3], О. М. Талипов[4]*
[1,2,3,4]Торайғыров университеті,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
31.10.25 ж. баспаға түсті.
17.11.25 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АТОМ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯСЫНЫҢ 500 КВ ОРУ СХЕМАСЫНЫҢ СЕНІМДІЛІГІН АҚАУЛАР АҒАШЫ ӘДІСІМЕН БАҒАЛАУ

Мақалада атом электр станцияларының (АЭС) ашық тарату құрылғылары (АТҚ) схемаларының сенімділігін бағалау үшін қолданылатын ақаулар ағашы әдісін қамтитын логикалық-ықтималдық әдісінің қолданылуы қарастырылады. Зерттеу нысаны ретінде Үндістандағы ең ірі атом электр станцияларының бірі – әрқайсысының қуаты 1000 МВт болатын екі блогы бар Куданкулам АЭС-нің 500 кВ АТҚ схемасы таңдалды. Жұмыстың мақсаты – АТҚ схемасының жеке элементтерінің ақаулары генерацияланатын қуаттың жоғалуына қалай әсер ететінін талдау кезінде ақаулар ағашы әдісінің тиімділігін көрсету. Мақалада соңғы оқиғаны формализациялауды, аралық және бастапқы оқиғаларды логика алгебрасының функцияларын пайдалана отырып сипаттауды қамтитын ақаулар ағашын құру алгоритмі берілген. Бес ықтимал зақым түрінің мысалында ақаулар ағашының фрагменттері жасалды, бұл әрбір элементтің АТҚ схемасының жалпы сенімділігіне қосқан үлесін бейнелеуге және генерацияланатын қуаттың жоғалу жиілігі мен қалыпты режимді қалпына келтірудің салыстырмалы ұзақтығын есептеу өрнектерін алуға мүмкіндік берді. Ақаулар ағашы әдісі жеке элементтердің ақаулары мен АТҚ АЭС схемасының жалпы күйі

арасындағы өзара байланыстарды айқын көрсетуге мүмкіндік беретіні және мұндай схемалардың сенімділігін бағалауда кестелік-логикалық әдісті толықтыру ретінде пайдалануға болатыны анықталды.

Кілтті сөздер: АТҚ схемаларының сенімділігі, атом электр станциясы, логикалық-ықтималдық әдіс, ақаулар ағашы, элементтердің ақаулары, генерацияланатын қуат, қалпына келтіру ұзақтығы.

*A. S. Barukin[1], *A. Zh. Dinmukhanbetova[2], B. E. Mashrapov[3], O. M. Talipov[4]*
[1,2,3,4]Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 31.10.25.
Received in revised form 17.11.25.
Accepted for publication 31.08.26.

RELIABILITY ASSESSMENT OF A 500 KV OPEN SWITCHYARD SCHEME OF A NUCLEAR POWER PLANT USING THE FAULT TREE METHOD

The article discusses the application of the logic-probabilistic method using fault tree analysis to assess the reliability of open switchyard (OSY) schemes of nuclear power plants (NPPs). The 500 kV OSY scheme of India's largest NPP – Kudankulam, consisting of two 1000 MW units, was selected as the object of study. The purpose of the work is to demonstrate the effectiveness of the fault tree method in analyzing the impact of individual component failures in the OSY scheme on the loss of generated power. The paper presents the algorithm for constructing a fault tree, including the formalization of the top event and the description of intermediate and primary events using Boolean logic functions. Based on five possible types of failures, fragments of fault trees were constructed, illustrating the contribution of each element to the overall reliability of the OSY scheme and providing analytical expressions for calculating the frequency of power loss and the relative duration of restoration to normal operation. It was established that the fault tree method provides a clear representation of the relationships between individual equipment failures and the overall state of the OSY scheme of an NPP and can be used as a complement to the tabular-logical method in reliability assessment of such configurations.

Keywords: reliability of OSY schemes, nuclear power plant, logic-probabilistic method, fault tree, equipment failures, generated power, recovery duration.

МРНТИ 44.39.03

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/146-165

К. А. Байжанов[1], С. С. Исенов[2], Д. Д. Исабеков[3]

[1,2]Казахский агротехнический исследовательский
университет имени С. Сейфуллина,
Республика Казахстан, г. Астана;
[3]Торайгыров университет,
Республика Казахстан, г. Павлодар.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6653-1140
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4576-4621
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6673-5646
*e-mail: bnovkairat@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ СТАБИЛИЗАЦИИ МОЩНОСТИ ВЕТРОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ В ИЗОЛИРОВАННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ НЕФТЕГАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ

В статье представлен обзорно-аналитический анализ технологий стабилизации мощности ветровой генерации, ориентированный на их применение в изолированных промышленных энергосистемах нефтегазовых объектов. Рассматриваются системные вызовы, связанные с интеграцией стохастических возобновляемых источников энергии в слабые сети с мощной динамической нагрузкой, характерной для нефтегазовой отрасли. Проведена систематизация и классификация существующих подходов к стабилизации, с особым акцентом на системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Выполнен многокритериальный сравнительный анализ ключевых технологий накопления: литий-ионных, натрий-серных и проточных редокс-батарей, суперконденсаторов, маховичных и водородных накопителей. Анализ основан на обобщении данных из открытых научных публикаций и отчетов. Выявлены преимущества, недостатки и области рационального применения каждой технологии для решения задач сглаживания флуктуаций мощности, регулирования частоты и напряжения, а также демпфирования электромеханических колебаний. Обсуждаются ограничения и перспективы применения гибридных систем накопления и водородных технологий в контексте специфических условий эксплуатации в западных регионах Казахстана, включая климатические факторы и требования к надежности. Результаты исследования формируют основу для разработки обоснованного подхода к выбору оптимальных технологических решений для повышения устойчивости и надежности автономного электроснабжения промышленных объектов.

Ключевые слова: изолированная энергосистема, ветровая генерация, накопитель энергии, BESS, стабилизация мощности, качество электроэнергии, нефтегазовая отрасль, сравнительный анализ.

Введение

Нефтегазовая отрасль Казахстана сосредоточена преимущественно в западных регионах страны. Освоение новых месторождений сопровождается ростом энергопотребления [1]. Значительная часть объектов расположена в удалённых районах и работает в изолированном или полуизолированном режиме относительно Единой электроэнергетической системы.

Энергоснабжение таких объектов ограничено высокой стоимостью и длительными сроками технологического присоединения (18–36 месяцев), износом сетевой инфраструктуры и нестабильным качеством электроэнергии. Крупные аварии в западном энергоузле последних лет показали зависимость производств от внешней сети и уязвимость удалённых площадок.

Развитие автономной генерации, включая ВИЭ, рассматривается как одно из ключевых направлений. Западные регионы обладают высоким ветровым потенциалом, однако переменный характер выработки создаёт проблемы устойчивости изолированных энергосистем. Колебания мощности приводят к отклонениям частоты и напряжения, особенно при работе мощных электроприводов насосов и компрессоров.

Для стабилизации режимов применяются системы накопления электрической энергии (СНЭЭ), способные быстро поглощать избыточную мощность и отдавать её при дефиците. Это обеспечивает сглаживание выработки, регулирование частоты и напряжения и снижение колебаний в сети.

Несмотря на большое количество работ по интеграции систем накопления энергии, большинство исследований посвящено экономическим аспектам или крупным энергосетям. Вопрос сравнительного анализа технологий накопления и их влияния на динамическую устойчивость изолированных промышленных микрогридов остаётся недостаточно проработанным.

Цель исследования: сравнительный анализ технологий стабилизации мощности ветровой генерации и обоснование многокритериального

подхода к выбору накопителей энергии для изолированных энергосистем нефтегазовых объектов Западного Казахстана.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

– Обзор и классификация технологий стабилизации ветровой генерации;

– Анализ применения накопителей энергии в изолированных промышленных системах;

– Сравнительный анализ ключевых технологий накопления энергии по техническим и экономическим параметрам;

– Оценка областей их рационального применения.

Научная новизна и вклад автора:

В настоящей работе получены следующие научные результаты, обладающие элементами новизны:

– Предложен многокритериальный подход к выбору технологий накопления энергии с учётом временных, экономических и климатических факторов;

– Показана зависимость эффективности накопителей от временных масштабов возмущений мощности ВЭС;

– Сформирована классификация ролей накопителей в автономных энергосистемах нефтегазовых объектов.

Практическая значимость состоит в применении результатов при проектировании автономных и изолированных систем электроснабжения нефтегазовой отрасли.

Материалы и методы

Интеграция ветровой генерации в энергосистемы, особенно в изолированные, сопряжена с рядом технических вызовов, обусловленных ее переменчивым характером. Основными проблемами являются флуктуации выходной мощности, которые приводят к отклонениям частоты и напряжения в сети, что негативно сказывается на общей стабильности и качестве электроэнергии [2; 3]. Для решения этих проблем активно разрабатываются и применяются различные подходы, которые можно классифицировать по принципу действия и временному горизонту регулирования.

Методы на стороне генерации. Современные ветроэнергетические установки, особенно на базе генераторов с двойным питанием (DFIG) и полным преобразователем мощности (FPC), способны быстро регулировать активную и реактивную мощность [4]. Применение синтетической инерции и продвинутых алгоритмов управления шагом лопастей позволяет сглаживать кратковременные колебания выработки. Однако диапазон такого

регулирования ограничен: при длительных провалах или избытках генерации этих мер, как правило, недостаточно [5].

Методы на стороне потребления. Регулирование нагрузки, прежде всего на промышленных объектах, может использоваться для балансировки системы. Тем не менее для нефтегазовых предприятий с непрерывным технологическим циклом возможности отключения или снижения основной нагрузки (насосов, компрессоров) минимальны и связаны с риском нарушения производственного процесса.

Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ): Наиболее универсальным инструментом стабилизации ветровой генерации остаются системы накопления. Они позволяют сбалансировать по времени производство и потребление энергии, аккумулируя излишки и отдавая их в периоды дефицита, тем самым повышая управляемость и гибкость энергосистемы.

1. Электрохимические накопители (аккумуляторные батареи):

• Литий-ионные батареи (Li-ion): На сегодняшний день являются доминирующей технологией для задач стабилизации энергосистем благодаря высокой плотности энергии, длительному сроку службы, высокому КПД (85-95%) и быстро снижающейся стоимости. Они способны к быстрому заряду/разряду, что делает их идеальными для сглаживания краткосрочных и среднесрочных колебаний мощности. Ключевые компоненты системы (BESS – Battery Energy Storage System) включают аккумуляторные модули, систему управления батареями (BMS), систему преобразования мощности (PCS) и систему управления энергией (EMS).

• Натрий-серные батареи (NaS): Высокотемпературные батареи (рабочая температура 300-350°C), характеризующиеся высокой плотностью энергии и длительным сроком службы. Однако необходимость поддержания высокой температуры приводит к дополнительному собственному потреблению энергии и усложняет эксплуатацию.

• Проточные редокс-батареи: В этих системах энергия хранится в жидких электролитах, которые прокачиваются через электрохимическую ячейку. Ключевое преимущество – независимое масштабирование мощности (определяется размером ячейки) и энергоемкости (определяется объемом баков с электролитом). Это делает их перспективными для длительного хранения энергии (многочасового).

2. Электрические накопители (суперконденсаторы):

• Суперконденсаторы (Supercapacitors, SC): Также известные как ультраконденсаторы, они хранят энергию в электрическом поле. Их главное преимущество – огромная плотность мощности и практически

неограниченный циклический ресурс (сотни тысяч и миллионы циклов). Они способны заряжаться и разряжаться за секунды, что делает их идеальными для компенсации очень быстрых, высокочастотных флуктуаций мощности и обеспечения качества электроэнергии. Однако их плотность энергии значительно ниже, чем у аккумуляторов, что ограничивает их применение для длительного хранения.

3. Механические накопители:

• Маховичные накопители энергии (Flywheel Energy Storage Systems, FESS): Хранят энергию в виде кинетической энергии вращающегося с высокой скоростью ротора (маховика). Они эффективно применяются для кратковременного резервирования (UPS) и регулирования частоты. Ограничениями являются относительно высокое саморазряжение (из-за трения) и короткое время разряда (от секунд до нескольких минут).

4. Химические накопители (водородные системы):

• Водородные технологии: Эта технология предполагает производство «зеленого» водорода из избыточной энергии ВИЭ методом электролиза воды. Водород затем хранится (в сжатом или сжиженном виде) и при необходимости преобразуется обратно в электроэнергию с помощью топливных элементов или сжигания в газовых турбинах. Главное преимущество водорода – возможность очень длительного, вплоть до сезонного, хранения больших объемов энергии. Однако такие системы обладают более низкой скоростью реакции и меньшим КПД полного цикла «заряд-разряд» (30-50 %) по сравнению с BESS.

5. Гибридные системы накопления энергии (HESS):

• Для оптимизации работы и продления срока службы накопителей часто применяются гибридные системы, сочетающие технологии с разными характеристиками. Наиболее распространенной является комбинация аккумуляторов и суперконденсаторов. В такой системе суперконденсаторы отрабатывают быстрые, высокочастотные колебания мощности, а аккумуляторы – более медленные, но продолжительные изменения. Это позволяет снизить пиковые нагрузки на аккумуляторы, уменьшить их деградацию и повысить общую эффективность системы.

Таким образом, выбор технологии стабилизации зависит от конкретных задач: сглаживание кратковременных флуктуаций, регулирование частоты, сдвиг нагрузки или обеспечение длительной автономии. Для комплексного решения проблем в изолированных системах с ВЭУ наиболее перспективным представляется применение электрохимических и гибридных СНЭЭ.

Результаты и обсуждение

Применение СНЭЭ в изолированных промышленных энергосистемах (микрогридах) не ограничивается сглаживанием выработки ВИЭ. В таких конфигурациях накопители фактически становятся опорным элементом системы, от которого зависит её устойчивая и предсказуемая работа.

Формирование сети (Grid-Forming). В изолированном режиме, в отсутствие связи с мощной внешней энергосистемой, необходимо устройство, которое будет «задавать» параметры сети – стабильное напряжение и частоту. Традиционно эту роль выполняют синхронные генераторы (например, ДГУ). Однако при высокой доле ВИЭ, подключенных через инверторы, работающие в режиме «следования за сетью» (Grid-Following, GFL), система теряет жесткость и инерцию. Современные инверторы СНЭЭ могут работать в режиме «формирования сети» (Grid-Forming, GFM). GFM-инверторы способны самостоятельно создавать и поддерживать синусоиду напряжения и номинальную частоту, фактически эмулируя поведение синхронного генератора [6].

Регулирование частоты и инерционный отклик. Изолированные системы с преобладанием инверторной генерации обладают низкой инерцией. Это может вызвать срабатывание защит и каскадное отключение генерации и нагрузки. СНЭЭ с быстрым откликом способны обеспечить первичное регулирование частоты, практически мгновенно компенсируя разницу между генерацией и потреблением.

Регулирование напряжения и компенсация реактивной мощности. Нагрузка нефтегазовых объектов. Прямой пуск мощного двигателя в слабой сети вызывает глубокие просадки напряжения, что может привести к сбоям в работе другого оборудования. Инвертор СНЭЭ способен независимо и быстро управлять активной и реактивной мощностью. В момент пуска двигателя СНЭЭ может мгновенно выдать в сеть необходимую реактивную мощность, поддерживая напряжение в допустимых пределах.

Демпфирование электромеханических колебаний. В энергосистемах, содержащих как синхронные машины, так и инверторную генерацию, могут возникать низкочастотные (0.1–2.0 Гц) электромеханические колебания мощности. Исследования показывают, что СНЭЭ, оснащенные специальными контроллерами, могут эффективно подавлять эти колебания [7]. Контроллер анализирует колебания мощности или частоты в сети и модулирует выходную мощность СНЭЭ в противофазе.

Повышение качества электроэнергии. Помимо стабилизации частоты и напряжения, СНЭЭ могут выполнять функции активного фильтра, компенсируя гармонические искажения, вносимые нелинейной нагрузкой,

и устраняя фликер (колебания напряжения), что критично для чувствительного электронного оборудования и систем управления.

Таким образом, в изолированной промышленной системе СНЭЭ выступает не просто как буфер для энергии ВИЭ, а как многофункциональное системообразующее устройство, обеспечивающее устойчивость, надежность и качество электроэнергии. Выбор конкретной технологии СНЭЭ должен основываться на анализе того, какие из перечисленных функций являются приоритетными для данного объекта. Технические параметры рассматриваемых технологий накопления обобщены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические параметры систем накопления энергии для нефтегазовых микросетей

Вид	**Литий-ионные батареи**	**Натрий-серные**	**Проточные редокс**	**Суперкон-денсаторы**	**Маховики**	**Водо-родные системы**
Плотность энергии (Вт·ч/кг)	100-265	150–240	25–75	5–10	~100 (в системе)	>1000 (систем-ная)
Количество циклов	3,000–10,000	~4,500	>10,000	>500,000	>100,000	Зависит от компо-нента
КПД полного цикла (%)	85–95	75–85	65–85	95–98	85–95	30–50
Диапазон рабочих температур (°C)	-20 до +60 (с BMS)	300–350	-5 до +50	-40 до +65	-20 до +45	-20 до +50
Оценочный LCOS ($/МВт·ч)	150–250	280–400	200–500	>1000	>800	>500

Литий-ионные аккумуляторы

Преимущества: высокая плотность энергии (100–265 Вт·ч/кг), КПД 85–95 %, быстрый отклик и ресурс 3000–10000 циклов. Применяются для регулирования частоты, напряжения и сдвига нагрузки [8].

Недостатки и ограничения: необходимость сложной системы управления и пожарной защиты, зависимость ресурса от температуры

окружающей среды, дополнительные затраты на термостатирование в суровом климате.

Область применения: стабилизация режимов в диапазоне от секунд до нескольких часов, формирование сети и сглаживание мощности.

Суперконденсаторы

Преимущества: высокая плотность мощности, быстрый отклик, ресурс свыше 500 000 циклов и широкий температурный диапазон. КПД 95-98 %.

Недостатки и ограничения: низкая плотность энергии и высокая стоимость в пересчёте на кВт·ч.

Область применения: кратковременная компенсация флуктуаций мощности, поддержка напряжения при пуске двигателей и работа в составе гибридных систем с аккумуляторами [9].

Маховичные накопители

Преимущества: Аналогичны суперконденсаторам по характеристикам: высокая плотность мощности, быстрый отклик, очень долгий срок службы, не зависящий от глубины разряда. Экологически чистые, так как не используют токсичных материалов.

Недостатки и ограничения: Короткое время хранения (от секунд до 15-20 минут). Наличие вращающихся частей требует обслуживания. Более высокий уровень саморазряда по сравнению с электрохимическими системами. Капитальные затраты на единицу энергии ($/кВт·ч) высоки, что ограничивает их применение для задач длительного хранения.

Область применения: Регулирование частоты на рынках вспомогательных услуг, обеспечение бесперебойного питания (UPS) для критически важного оборудования до запуска резервных дизель-генераторов, сглаживание кратковременных провалов и всплесков мощности.

Проточные редокс-батареи

Преимущества: Независимое масштабирование мощности и энергоемкости, ресурс 10 000 – 20 000 циклов, высокая пожаробезопасность.

Недостатки и ограничения: Низкая плотность энергии и КПД 65–85 %, медленный отклик и необходимость обслуживания гидравлической системы; отдельные электролиты могут быть токсичными.

Область применения: Длительный сдвиг нагрузки, накопление энергии ВЭУ и резервное питание на несколько часов.

Натрий-серные батареи

Преимущества: высокая плотность энергии и использование доступных материалов.

Недостатки и ограничения: рабочая температура 300–350 °C, потери на подогрев и риски безопасности.

Область применения: стационарные системы сдвига нагрузки и резерв мощности с разрядом 6–8 часов.

Водородные технологии

Преимущества: Уникальная способность к сверхдлительному (сезонному) хранению практически неограниченных объемов энергии [10]. Водород может использоваться не только для генерации электроэнергии, но и как сырье в химической промышленности или топливо для транспорта, что создает дополнительные экономические возможности.

Недостатки и ограничения: Низкий КПД полного цикла (30-50 %). Высокие капитальные затраты на электролизеры и топливные элементы. Относительно медленная скорость реакции по сравнению с BESS, что не позволяет эффективно участвовать в быстром регулировании частоты. Проблемы хранения и транспортировки водорода. Технология все еще находится на ранней стадии коммерциализации для задач энергосистем.

Область применения: Стратегическое резервирование, обеспечение 100 % автономности на ВИЭ за счет сезонного хранения энергии, декарбонизация промышленных процессов.

Для обоснованного выбора технологий накопления энергии в условиях изолированных энергосистем нефтегазовых объектов в работе использован многокритериальный аналитический подход. Предложенный подход учитывает специфику автономных нагрузок, повышенные требования к надёжности и ограниченные возможности резервирования – аспекты, которые в большинстве существующих обзорных работ [2; 3; 9] остаются нерассмотренными применительно к изолированным промышленным системам нефтегазовой отрасли.

В качестве основных критериев оценки выбраны следующие параметры:

- Время отклика – способность технологии компенсировать кратковременные провалы и скачки мощности ветровой генерации.
- Энергоемкость – возможность покрытия дефицита мощности в течение заданного интервала времени.
- Надежность и отказоустойчивость – работа системы при отказах и перегрузках.
- Климатическая устойчивость – работа при низких и высоких температурах, характерных для Западного Казахстана
- Срок службы и деградация – влияние цикличности работы на ресурс оборудования.
- Капитальные затраты (CAPEX) – инвестиционные затраты на внедрение технологии.

- Эксплуатационные затраты (OPEX) – затраты на обслуживание и ремонт.
- Масштабируемость – возможность поэтапного наращивания мощности системы накопления.

Оценка по каждому критерию выполнена с использованием качественной шкалы (низкий / средний / высокий), что позволяет сохранить аналитический вес исследования без применения сложных математических моделей. Данный подход (WSM — Weighted Sum Model) предпочтён более формальным методам (AHP, TOPSIS) ввиду ограниченной доступности количественных объектных данных по изолированным объектам Западного Казахстана: применение точных нормализованных матриц при отсутствии реальных паспортных данных создаёт риск ложной точности результата. При этом критерии ранжированы по степени приоритетности для данного типа объектов: наивысший приоритет имеют время отклика и надёжность, за ними следуют климатическая устойчивость, КПД цикла и стоимость хранения (LCOS). Результаты многокритериальной оценки представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Качественная многокритериальная оценка технологий накопления энергии для изолированных систем. (Составлено автором на основе анализа источников [9; 10])

Критерий	**Li-ion BESS**	**Суперкон-денсаторы**	**Маховики (FESS)**	**Проточные батареи**	**Водородные системы**
Время отклика	Высокое	Очень высокое	Очень высокое	Среднее	Низкое
Плотность мощности	Высокая	Очень высокая	Очень высокая	Средняя	Средняя
Плотность энергии	Высокая	Очень низкая	Низкая	Средняя	Очень высокая
Циклический ресурс	Средний	Очень высокий	Очень высокий	Высокий	Средний
КПД полного цикла	Высокий	Очень высокий	Высокий	Средний	Низкий
Климатическая устойчивость	Средняя	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя
Приведенная стоимость (LCOS)	Низкая	Очень высокая	Высокая	Средняя	Высокая
Надежность и ТО	Средняя	Высокая	Средняя	Средняя	Низкая

Для наглядной демонстрации областей рационального применения различных СНЭЭ в таблице 3 представлена матрица соответствия технологий ключевым функциям, которые они могут выполнять в изолированной энергосистеме. Характерные диапазоны времени отклика различных технологий накопления показаны на рисунке 1.

Таблица 3 – Матрица соответствия технологий функциям энергосистемы

Функция в энергосистеме	**Li-ion BESS**	**Суперкон-денсаторы**	**Маховики (FESS)**	**Проточные батареи**	**Водородные системы**
Формирование сети (Grid-Forming)	+++	+	+	++	+
Регулирование частоты (быстрое)	+++	+++	+++	+	-
Регулирование напряжения (VAR)	+++	+++	++	++	+
Сглаживание мощности (секунды-минуты)	+++	+++	+++	+	-
Демпфирование колебаний	+++	++	++	+	-
Сдвиг нагрузки (часы)	++	-	-	+++	+++
Сезонное хранение (дни-месяцы)	-	-	-	-	+++

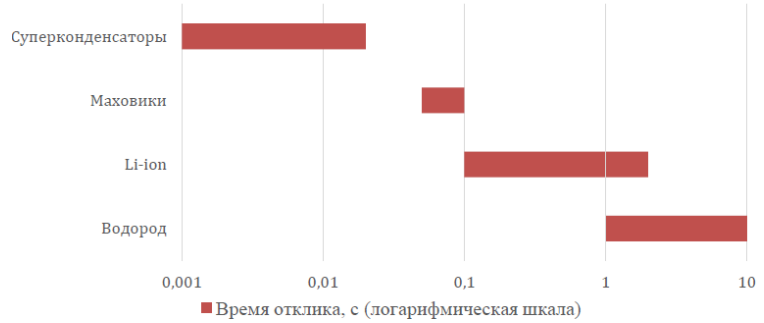


Рисунок 1 – Характерные диапазоны времени отклика различных технологий накопления энергии при резких флуктуациях мощности ветровой генерации

Условия эксплуатации энергосистем нефтегазовых объектов Западного Казахстана характеризуются значительными суточными и сезонными колебаниями ветровой нагрузки, ограниченной ремонтопригодностью оборудования и повышенными требованиями к бесперебойности электроснабжения. В этих условиях универсальные решения, применяемые в централизованных энергосистемах, не всегда обеспечивают требуемый уровень устойчивости.

Результаты проведенного анализа показывают, что наибольший эффект достигается при использовании гибридных систем накопления энергии, сочетающих технологии с различным временем отклика и энергоемкостью. Такой подход позволяет одновременно решать задачи стабилизации частоты, сглаживания кратковременных провалов мощности и обеспечения резервирования нагрузки. Сравнение приведённой стоимости хранения энергии (LCOS) по технологиям показано на рисунке 2.

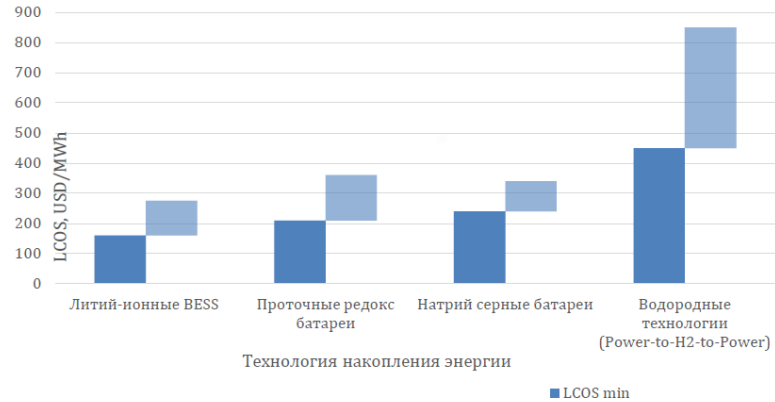


Рисунок 2 – Гистограмма приведённой стоимости хранения энергии (LCOS) для различных технологий накопления на основе обобщения данных открытых источников за 2023–2025 гг.

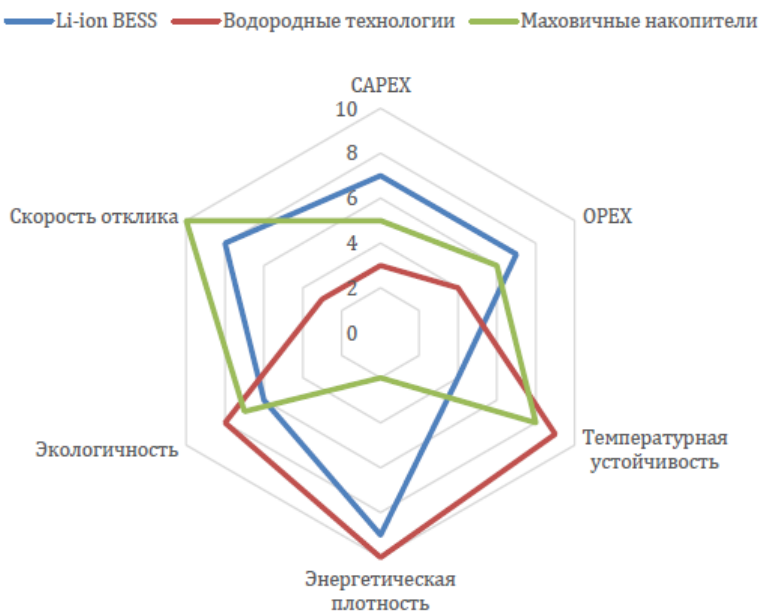


Рисунок 3 – Качественная многокритериальная оценка технологий накопления энергии

Диаграмма отражает экспертно-аналитическое сравнение литий-ионных, водородных и маховичных систем накопления энергии по совокупности экономических, эксплуатационных и климатических критериев

Для изолированной системы нефтегазового объекта, где требуется одновременно сглаживать быстрые флуктуации ВЭУ, компенсировать пусковые токи двигателей и обеспечивать стабильность частоты и напряжения, ключевыми являются высокая плотность мощности и быстрый отклик. С этой точки зрения, литий-ионные BESS на сегодняшний день представляют собой наиболее сбалансированное и технологически зрелое решение. Их способность выполнять множество системных услуг (формирование сети, регулирование частоты/напряжения, демпфирование колебаний) в рамках одного устройства делает их особенно привлекательными [11]. Качественное многокритериальное сравнение ключевых технологий в графическом виде представлено на рисунке 3.

Однако при их применении в условиях Западного Казахстана необходимо уделить особое внимание двум аспектам. Во-первых, это климатические условия. Резко континентальный климат характеризуется среднемесячными

температурами от −18...−22 °C в январе до +35...+38 °C в июле; число дней с температурой ниже −20 °C достигает 15–25 в год. При температурах ниже −20 °C литий-ионные батареи теряют 30–40 % номинальной ёмкости, что увеличивает собственное потребление системы обогрева на 3–8 %; для NaS-батарей необходимость непрерывного поддержания 300–350 °C в арктических условиях повышает расчётный LCOS на 15–25 % по сравнению с умеренным климатом. Это потребует установки BESS в термостатированных контейнерах с надежными системами отопления и кондиционирования. Это увеличивает капитальные и оперативные затраты (за счет собственного потребления) и должно учитываться при экономическом обосновании проекта. Во-вторых, требования к безопасности на объектах нефтегазовой отрасли являются первостепенными. Необходимо применять BESS с наиболее безопасной химией (например, литий-железо-фосфат), а также предусматривать многоуровневые системы мониторинга, газоанализа и автоматического пожаротушения, соответствующие стандартам для взрывоопасных зон.

Перспективы гибридных систем (HESS). Для оптимизации работы и снижения нагрузки на основной аккумуляторный массив перспективным является применение гибридных систем. Комбинация литий-ионных батарей и суперконденсаторов (SC) представляется наиболее рациональной для рассматриваемых условий. В такой конфигурации SC берут на себя компенсацию самых быстрых и мощных возмущений (например, начальный бросок тока при пуске двигателя), в то время как BESS обеспечивает более длительную поддержку мощности и регулирование частоты [12]. Это позволяет уменьшить пиковые токи разряда BESS, что положительно сказывается на их деградации и сроке службы, а также потенциально снизить требуемую пиковую мощность инвертора BESS.

Роль водородных технологий. В долгосрочной перспективе, по мере снижения стоимости электролизеров и топливных элементов, водородные системы могут занять свою нишу. Для удаленных объектов, стремящихся к максимальной энергонезависимости и декарбонизации, водород может стать решением для сезонного хранения энергии, компенсируя длительные периоды безветрия, которые не могут быть покрыты аккумуляторными системами [13]. Казахстан обладает значительным потенциалом для производства «зеленого» водорода. Однако на текущем этапе развития технологии, водородные системы следует рассматривать не как замену, а как дополнение к более быстрым накопителям (BESS), решающее задачи стратегического, а не оперативного резервирования.

Таким образом, для текущего технологического уровня и ближайшей перспективы (5-10 лет) оптимальной стратегией для стабилизации изолированных энергосистем нефтегазовых объектов является использование литий-ионных BESS, возможно, в гибридном исполнении с суперконденсаторами. При этом проектирование системы должно в обязательном порядке учитывать экстремальные климатические условия региона и повышенные требования к промышленной безопасности. В отличие от рассмотренных работ, ориентированных преимущественно на крупные централизованные энергосистемы, настоящее исследование сфокусировано на специфике изолированных микрогридов с мощной двигательной нагрузкой, для которых временные масштабы возмущений и требования к быстродействию принципиально иные. Предложенный подход с климатическими поправками для условий Западного Казахстана не был реализован ни в одной из проанализированных работ применительно к нефтегазовым объектам данного региона.

Информация о финансировании

Данная работа является результатом, полученным в ходе реализации проекта ИРН AP32718997 (2026), финансируемого в рамках грантового финансирования от Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

Выводы

В рамках настоящего исследования проведен системный сравнительный анализ технологий стабилизации мощности ветровой генерации с фокусом на их применимость в изолированных энергосистемах удаленных нефтегазовых объектов. Анализ мирового опыта и научных публикаций позволил сформулировать следующие ключевые выводы.

1. Изолированные промышленные энергосистемы с высокой долей ветровой генерации и мощной динамической нагрузкой (насосы, компрессоры) представляют собой «слабые» сети с низкой инерцией. Они подвержены значительным отклонениям частоты и напряжения, а также риску возникновения низкочастотных колебаний мощности, что может привести к потере динамической устойчивости и нарушению технологических процессов. Простого управления мощностью на стороне ВЭУ недостаточно для обеспечения требуемого уровня надежности и качества электроэнергии.

2. Системы накопления электрической энергии являются ключевым технологическим решением, позволяющим не только сглаживать стохастический характер ветровой генерации, но и выполнять ряд критически важных системных функций: формирование параметров сети

в островном режиме (GFM), быстрое регулирование частоты и напряжения, компенсация реактивной мощности и демпфирование электромеханических колебаний. СНЭЭ трансформируют пассивную энергосистему в активно управляемый микрогрид.

3. Проведенный многокритериальный сравнительный анализ показал, что различные технологии накопления обладают уникальным набором характеристик, определяющим их рациональную область применения. Суперконденсаторы и маховики эффективны для компенсации сверхбыстрых флуктуаций мощности и улучшения качества энергии. Проточные и натрий-серные батареи лучше подходят для многочасового сдвига нагрузки. Водородные системы являются перспективным решением для долгосрочного и сезонного хранения больших объемов энергии.

4. Для комплексного решения задач стабилизации в изолированных энергосистемах нефтегазовых объектов, требующих сочетания быстрого отклика и достаточной энергоемкости, на современном этапе технологического развития наиболее сбалансированным и коммерчески зрелым решением являются литий-ионные аккумуляторные системы (Li-ion BESS). Их универсальность позволяет эффективно решать задачи как оперативного регулирования (секунды-минуты), так и краткосрочного сдвига нагрузки (до нескольких часов).

5. Научная новизна исследования заключается в систематизации технологий и формировании многокритериального подхода к их выбору, адаптированного к специфическим условиям изолированных промышленных объектов Западного Казахстана. В отличие от общих исследований, акцент сделан на одновременном учете стохастической генерации, динамической нелинейной нагрузки, экстремальных климатических факторов и повышенных требований к промышленной безопасности.

Практическая значимость работы состоит в предоставлении инженерно-техническим специалистам научно обоснованной базы для принятия решений при проектировании автономных энергокомплексов. Обоснованный выбор технологии стабилизации, в частности, применение Li-ion BESS (потенциально в гибридном исполнении с суперконденсаторами), позволит повысить надежность электроснабжения критически важного оборудования, минимизировать риски производственных потерь и ускорить безопасную интеграцию ветроэнергетики в энергобаланс нефтегазовой отрасли Казахстана. Дальнейшие исследования должны быть направлены на технико-экономическую оптимизацию параметров СНЭЭ для конкретных объектов и разработку адаптивных алгоритмов управления, учитывающих износ оборудования и изменяющиеся условия эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Kazakhstan energy profile // IEA. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.iea.org/reports/kazakhstan-energy-profile/energy-security.

2 **Mastoi, M. S., et al.** Critical comparison of storage technologies for wind energy fluctuation mitigation // Applied Energy. – 2025. – Vol. 385. – P. 125412.

3 **Mahadevan, V., et al.** This review offers a quantitative comparison of major ESS technologies mechanical electrical electrochemical thermal and chemical storage systems // Journal of Energy Storage. – 2025. – Vol. 93. – P. 112345.

4 **de Siqueira, L. M. S. & Peng, W.** Control strategy to smooth wind power output using battery energy storage system: A review // Journal of Energy Storage. – 2021. – Vol. 35. – P. 102252.

5 **Eroğlu, H., et al.** Techno-economic analysis of battery energy storage systems integrated into wind power plants // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – P. 18863.

6 **Gajewski, P. & Pieńkowski, K.** Control of the hybrid renewable energy system with wind turbine, photovoltaic panels and battery energy storage // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 6. – P. 1595. – https://doi.org/10.3390/en14061595

7 **Chen, X., et al.** Damping enhancement of power systems via control parameter tuning of grid-forming battery energy storage system // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2025. – Vol. 168. – P. 110943.

8 **Hasanvand, S., Sobhani, H., Mardaneh, M., & Khooban, M.** Optimal Design of Battery Energy Storage System Controllers for Damping Low-Frequency Oscillations // ETRI Journal. – 2025. – https://doi.org/10.1155/er/2248945

9 **Kamarposhti, M. A., et al.** Design and Optimization of a Robust Wide-Area Damping Controller for Mitigating Inter-Area Oscillations in Wind-Integrated Power Systems // Energies. – 2025. – Vol. 18, No. 1. – P. 234. – https://doi.org/10.1002/ese3.70161

10 **Kumar, R., et al.** Effect of battery energy storage system on inter-area oscillations under varying load conditions // Materials Today: Proceedings. – 2024.

11 **Zhu, Y.** Control and Placement of Battery Energy Storage Systems for Power System Oscillation Damping : PhD diss. – University of Tennessee, 2018.

12 **Bowen, T., et al.** Grid-Scale Battery Storage: Frequently Asked Questions. – NREL/TP-6A20-76097. – Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory, 2021. – 50 p.

13 **Jan, K. U., Dubois, A. M., & Diallo, D.** Hybrid Battery-SC and Battery-Battery Multistage Design and Energy Management for Power Sharing // IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – 2021. – P. 1–6.

Поступило в редакцию 30.01.26.
Поступило с исправлениями 27.04.26.
Принято в печать 03.09.26.

**Қ. Ә. Байжанов[1], С. С. Исенов[2], Д. Д. Исабеков[3]*
[1,2]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[3]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
30.01.26 ж. баспаға түсті.
27.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
03.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

МҰНАЙ-ГАЗ НЫСАНДАРЫНЫҢ ОҚШАУЛАНҒАН ЭНЕРГИЯ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕГІ ЖЕЛІ ГЕНЕРАЦИЯСЫ ҚУАТЫН ТҰРАҚТАНДЫРУ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫНА САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Мұнай-газ секторының оқшауланған өнеркәсіптік энергия жүйелерінде қолдануға бағытталған желі генерациясының қуатын тұрақтандыру технологияларына шолу-аналитикалық талдау ұсынылған. Мұнай-газ саласына тән қуатты динамикалық жүктемесі бар әлсіз желілерге стохастикалық жаңартылатын энергия көздерін біріктірумен байланысты жүйелік қиындықтар қарастырылады. Электр энергиясын жинақтау жүйелеріне (ЭЭЖЖ) ерекше назар аудара отырып, тұрақтандырудың қолданыстағы тәсілдерін жүйелеу және жіктеу жүргізілді. Негізгі жинақтау технологияларына: литий-ионды, натрий-күкіртті және ағынды редокс-батареяларға, суперконденсаторларға, маховикті және сутекті жинақтағыштарға көпкритерийлі салыстырмалы талдау жасалды. Талдау ғылыми жарияланымдар мен есептердегі деректерді жалпылауға негізделген. Қуат ауытқуларын тегістеу, жиілік пен кернеуді реттеу, сондай-ақ электромеханикалық тербелістерді демпферлеу міндеттерін шешу үшін әр технологияның артықшылықтары, кемшіліктері және ұтымды қолдану салалары анықталды. Қазақстанның батыс өңірлеріндегі ерекше пайдалану шарттары, соның ішінде климаттық факторлар мен сенімділікке қойылатын талаптар тұрғысында гибридті жинақтау жүйелері мен сутекті технологияларды қолданудың шектеулері мен

перспективалары талқыланады. Зерттеу нәтижелері өнеркәсіптік нысандардың автономды электрмен жабдықталуының тұрақтылығы мен сенімділігін арттыру үшін оңтайлы технологиялық шешімдерді таңдауға негізделген тәсілді әзірлеуге негіз болады.

Кілтті сөздер: оқшауланған энергия жүйесі, жел генерациясы, энергия жинақтағыш, BESS, қуатты тұрақтандыру, электр энергиясының сапасы, мұнай-газ саласы, салыстырмалы талдау.

**K. A. Baizhanov[1], S. S. Issenov[2], D. D. Isabekov[3]*
[1,2] S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[3]Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 30.01.26.
Received in revised form 27.04.26.
Accepted for publication 03.09.26.

COMPARATIVE ANALYSIS OF WIND POWER STABILIZATION TECHNOLOGIES FOR ISOLATED ENERGY SYSTEMS

This work presents a review and analytical analysis of wind power stabilization technologies, focusing on their application in isolated industrial power systems of oil and gas facilities. It examines the systemic challenges associated with integrating stochastic renewable energy sources into weak grids with powerful dynamic loads, which are characteristic of the oil and gas industry. A systematization and classification of existing stabilization approaches are carried out, with a special emphasis on Battery Energy Storage Systems (BESS). A multi-criteria comparative analysis of key storage technologies is performed, including lithium-ion, sodium-sulfur, and redox flow batteries, as well as supercapacitors, flywheel, and hydrogen storage systems. The analysis is based on a generalization of data from open scientific publications and reports. The advantages, disadvantages, and rational application areas of each technology are identified for solving tasks such as smoothing power fluctuations, regulating frequency and voltage, and damping electromechanical oscillations. The limitations and prospects for using hybrid storage and hydrogen technologies are discussed in the context of the specific operating conditions in the western regions of Kazakhstan,

including climatic factors and reliability requirements. The research results form a basis for developing a well-founded approach to selecting optimal technological solutions to enhance the stability and reliability of autonomous power supply for industrial facilities.

Keywords: isolated power system, wind power generation, energy storage system, BESS, power stabilization, power quality, oil and gas industry, comparative analysis.

SRSTI 50.03.03
https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/166-180

M. A. Beisenbi[1], *N. B. Shamken[2], T. N. Bekenov[3]
[1,2,3]L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2109-4512
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3080-2399
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0188-822X
*e-mail: nurastan98@gmail.com

SYNTHESIS OF SELF-ORGANIZING CONTROL FOR MIMO SYSTEMS VIA STRUCTURALLY STABLE MAPPINGS

The aim of this paper is to develop a synthesis method for a self-organizing control system for linear objects with m-inputs and n-outputs within the class of two-parameter structurally stable mappings. The proposed approach is based on the gradient-velocity method of Lyapunov vector functions. Conditions for aperiodic robust stability of stationary states are derived in the form of systems of parametric inequalities that define admissible regions of parameter variations. It is shown that transitions between stable states may occur due to bifurcations, which are interpreted as a manifestation of self-organization. A procedure for selecting a self-organizing model with prescribed transient characteristics is developed, along with a method for computing controller coefficients based on matching the stability conditions of the model and the control system. The scientific novelty of the work lies in the development of a unified synthesis framework that ensures aperiodic transient responses, robustness under parameter uncertainty, and suppression of oscillatory and chaotic regimes.

Keywords: self-organization, MIMO systems, bifurcation, Lyapunov method, robust stability, structurally stable mappings.

Introduction

The design of control systems capable of operating under uncertainty remains one of the central problems of modern control theory. In practical applications, systems are often affected by parameter variations, external disturbances, and modeling inaccuracies, which may significantly degrade performance and

lead to instability [1; 2]. These challenges become particularly critical for multidimensional systems with multiple inputs and outputs, where interactions between channels increase the complexity of the dynamic behavior and complicate the synthesis of control laws [3; 4].

Recent developments in nonlinear dynamics have demonstrated that even systems with relatively simple structures may exhibit multiple equilibrium states and undergo qualitative changes in behavior as parameters vary [5; 6]. Such phenomena are typically associated with bifurcations and may result in transitions between different dynamic regimes. While these effects introduce additional difficulties in control design, they also provide a basis for constructing adaptive control strategies that exploit the structural properties of the system.

One of the promising approaches in this direction is the use of structurally stable mappings derived from catastrophe theory [7; 8]. These mappings make it possible to represent the system dynamics in a form that explicitly accounts for the existence and transformation of equilibrium states. As a result, it becomes possible to influence system behavior through controlled variation of parameters, which is particularly important in the context of self-organizing systems.

Self-organizing control systems are characterized by the ability to modify their parameters or structure during operation in response to changes in the environment [9]. This property allows them to maintain stable operation even in the presence of uncertainty. A key requirement for such systems is the preservation of stability over a wide range of parameter variations, rather than only in a local neighborhood of equilibrium.

In this context, the concept of aperiodic robust stability plays an important role. It ensures that system trajectories converge monotonically to equilibrium states without oscillations or chaotic behavior, which is essential for reliable operation in engineering applications. The analysis of such stability properties requires the development of analytical methods capable of describing system behavior in multidimensional spaces.

An effective tool for this purpose is the gradient-based approach using Lyapunov vector functions, which allows the stability conditions to be formulated in terms of parameter constraints [10; 11]. This framework provides a systematic way to determine admissible regions of system parameters ensuring stable and non-oscillatory dynamics [12].

Despite the existing studies in this field, most of the available results are limited to systems of relatively low dimensionality. In particular, approaches developed for single-input single-output systems cannot be directly extended to the general multidimensional case without additional considerations [13; 14]. Therefore, the problem of synthesizing self-organizing control systems for objects with multiple inputs and outputs remains insufficiently explored.

The objective of this paper is to develop a synthesis method for self-organizing control systems for linear objects with m-inputs and n-outputs within the class of two-parameter structurally stable mappings. The proposed approach is aimed at ensuring aperiodic robust stability and achieving desired transient characteristics. The solution of this problem includes deriving stability conditions for stationary states, analyzing their changes under parameter variations, selecting a self-organizing model with required properties, and determining controller parameters based on consistency between the model and the control system.

Materials and methods

A synthesis framework for self-organizing control of linear MIMO systems is investigated using two-parameter structurally stable mappings as the underlying representation.

Consider a linear dynamic system described by

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \tag{1}$$

Where $x \in R^n$ is the state vector, and A and B are system matrices with uncertain parameters.

$$A = \begin{Vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{Vmatrix}, \quad B = \begin{Vmatrix} b_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & b_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & b_{nn} \end{Vmatrix}$$

The control input is formulated using a representation based on two-parameter structurally stable mappings and can be written as

$$u_i(t) = -x_i^4(t) - k_i^1 x_i^2(t) + k_i x_i(t), i = 1,\dots,n \tag{2}$$

Substituting (2) into (1), the closed-loop system can be written as

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_1 = -b_{11}x_1^4 - b_{11}k_1^1 x_1^2 + (a_{11} + b_{11}k_1)x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n \\ \dot{x}_2(t) = a_{21}x_2 - b_{22}x_2^4 - b_{22}k_2^1 x_2^2 + (a_{11} + b_{22}k_2)x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n \\ \dots \\ \dot{x}_n = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots - b_{nn}x_n^4 + b_{nn}k_n^1 x_n^2 + (a_{nn} + b_{nn}k_n)x_n \end{Bmatrix} \tag{3}$$

The stationary states of the system are determined from the condition

$$\begin{Bmatrix} -b_{11}x_1^4 + b_{11}k_1^1 x_1^2 + (a_{11} + b_{11}k_1)x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n = 0 \\ a_{21}x_1 - b_{22}x_2^4 - b_{22}k_2^1 x_2^2 + (a_{22} + b_{22}k_2)x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n = 0 \\ \dots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots - b_{nn}x_n^4 - b_{nn}k_n^1 x_n^2 + (a_{nn} + b_{nn}k_n)x_n = 0 \end{Bmatrix} \tag{4}$$

It follows from (4) that the trivial stationary state can be written as

$$x_{is}^1 = 0, i = 1,\dots,n \tag{5}$$

Apart from the trivial solution, the system also possesses additional equilibrium states, which are determined by

$$-b_{ii}x_{is}^3 - b_{ii}k_i^1 x_{is}^2 + (a_{ii} + b_{ii}k_i) = 0, i = 1,\dots,n \tag{6}$$

Equation (6) leads to the following solutions

$$\begin{cases} x_{is}^2 = \sqrt[3]{\dfrac{b_{ii}k_i - a_{ii}}{2b_{ii}}}, i = 1,\dots,n \\ x_{is}^{3,4} = -\sqrt[3]{\dfrac{b_{ii}k_i - a_{ii}}{2b_{ii}}}, k_i^1 = \sqrt[3]{\left(\dfrac{b_{ii}k_i - a_{ii}}{2b_{ii}}\right)^2} \end{cases} \tag{7}$$

The aperiodic robust stability of the stationary state (5) is examined using a gradient-based approach involving Lyapunov vector functions. The analysis is carried out for the system defined in (3), which is constructed using two-parameter structurally stable mappings.

The gradient-velocity approach relies on a geometric view of stability analysis associated with Lyapunov's second method and incorporates ideas from gradient dynamical systems. In this framework, the system dynamics can be represented in the form

$$\left(\frac{dx_i}{dt}\right)_{x_j} = -\frac{\partial V_i(x)}{\partial x_j}, i = 1,\dots,n; j = 1,\dots,n.$$

Where $x(t) \in R^n$ is the state vector of the dynamic system, and $V_i(x)$ is the Lyapunov vector function, whose components can be interpreted as potential functions.

Within this formulation, the system dynamics are governed by the gradient components of the Lyapunov vector function, while the velocity vector is expressed in terms of the state-space coordinates [15].

The conditions ensuring aperiodic robust stability follow from the requirement that the Lyapunov vector function *V(x)* is positive definite. According to the Morse lemma [16], it can be locally approximated by a quadratic form. As a result, the stability conditions can be formulated as a system of parameter inequalities consistent with classical robust control theory [17; 18]:

$$\begin{cases} -(a_{11} + b_{11}k_1 + a_{21} + a_{31} + \dots + a_{n1}) > 0 \\ -(a_{12} + a_{22} + b_{22}k_2 + a_{32} + \dots + a_{n2}) > 0 \\ -(a_{13} + a_{23} + a_{33} + b_{33}k_3 + \dots + a_{n3}) > 0 \\ \dots \\ -(a_{1n} + a_{2n} + a_{3n} + \dots + a_{nn} + b_{nn}k_n) > 0 \end{cases} \tag{8}$$

These inequalities (8) define the admissible parameter region in which the stationary state (5) is aperiodically robustly stable.

Depending on the system parameters, multiple stationary states may exist, which is a characteristic feature of systems constructed in the class of structurally stable mappings.

The evolution of the system is analyzed through the behavior of the time derivative of the Lyapunov function, in particular its sign. In this case, the derived inequalities guarantee monotonic convergence of system trajectories and exclude oscillatory and chaotic regimes.

To evaluate the aperiodic stability properties of the states (7), a gradient-based Lyapunov vector function method is applied. The system (3) is therefore reformulated in deviation variables with respect to the equilibrium (7).

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -b_{11}x_1^4 - 4b_{11}\sqrt[3]{\dfrac{b_{11}k_1 - a_{11}}{2b_{11}}}x_1^3 - 3b_{11}\sqrt[3]{\left(\dfrac{b_{11}k_1 - a_{11}}{2b_{11}}\right)^2}x_1^2 - \\ -(b_{11}k_1 - a_{11})x_1 - a_{12}x_2 - a_{13}x_3 -,\ldots,-a_{1n}x_n \\ \dot{x}_2 = -a_{22}x_1 - b_{22}x_2^4 - 4b_{22}\sqrt[3]{\dfrac{b_{22}k_2 - a_{22}}{2b_{22}}}x_2^3 - 3b_{22}\sqrt[3]{\left(\dfrac{b_{22}k_2 - a_{22}}{2b_{22}}\right)}x_2^2 - \\ -(b_{22}k_2 - a_{22})x_2 - a_{23}x_3 -,\ldots,-a_{2n}x_n \\ \qquad \ldots \\ \dot{x}_n = -a_{n1}x_1 - a_{n2}x_2 - a_{n3}x_3 - b_{nn}x_n^4 - 4b_{nn}\sqrt[3]{\dfrac{b_{nn}k_n^2 - a_{nn}}{2b_{nn}}}x_n^3 - \\ -3b_{nn}\sqrt[3]{\left(\dfrac{b_{nn}k_n - a_{nn}}{2b_{nn}}\right)^2}x_n^2 - (b_{nn}k_n - a_{nn})x_n \end{cases} \tag{9}$$

Aperiodic stability properties of system (9) are investigated by applying a gradient-based Lyapunov vector function method [19].

The requirement that the Lyapunov vector function is positive definite, which is equivalent to a quadratic form, leads to the conditions ensuring aperiodic robust stability of the stationary state (7). These conditions can be written as the following system of inequalities:

$$\begin{cases} b_{11} > 0, b_{22} > 0, \ldots, b_{nn} > 0 \\ b_{11}k_1 - a_{11} - a_{21} - a_{31} - \ldots - a_{n1} \geq 0 \\ -a_{12} + b_{22}k_2 - a_{22} - a_{32} - \ldots - a_{n2} \geq 0 \\ -a_{13} - a_{23} + b_{33}k_3 - a_{33} - \ldots - a_{n3} \geq 0 \\ \qquad \ldots \\ -a_{1n} - a_{2n} - a_{3n} - \ldots + b_{nn}k_n - a_{nn} \geq 0 \end{cases} \tag{10}$$

The set of inequalities (10) characterizes the parameter domain in which the stationary state (7) remains aperiodically stable.

The stationary state (5) exists and preserves aperiodic stability under variations of uncertain parameters of system (3) within the admissible region defined by (8). When these conditions are violated, a bifurcation occurs, leading to the appearance of the stationary state (7). The latter remains stable in the aperiodic sense within the parameter domain specified by (10).

As a result, a self-organizing model is constructed in the class of two-parameter structurally stable mappings, ensuring the desired transient response and specified parameters. The problem addressed here involves the selection and analysis of a self-organizing control system within the class of two-parameter structurally stable mappings.

Assume a self-organizing model with prescribed transient characteristics obtained through simulation. The model is described by

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_1^4 - d_1^1x_1^2 + d_1x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 - x_2^4 - d_2^1x_2^2 + d_2x_2 + \ldots + a_{2n}x_n \\ \qquad \ldots \\ \dot{x}_n = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \ldots - x_n^4 - d_n^1x_n^2 + d_nx_n \end{cases} \tag{11}$$

The system (11) is analyzed for given values of parameters d_i^1 and d_i, $(i = 1, 2, \ldots, n)$ within a gradient-based framework employing Lyapunov vector functions. It is shown that the model (11) possesses self-organizing properties.

The stationary states of model (11) are determined from

$$\begin{cases} -x_1^4 - d_1^1x_1^2 + d_1x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n = 0 \\ a_{21}x_1 - x_2^4 - d_2^1x_2^2 + d_2x_2 + \ldots + a_{2n}x_n \\ \qquad \ldots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \ldots - x_n^4 - d_n^1x_n^2 + d_nx_n = 0 \end{cases} \tag{12}$$

From (12), the trivial stationary state is obtained as

$$x_{is}^1 = 0, i = 1, \ldots, n \tag{13}$$

Nontrivial stationary states are determined by

$$-x_{is}^3 + d_i^1 x_{is}^2 + d_i x_{is} = 0, i = 1,...,n. \quad (14)$$

The solutions of (14) are given by

$$\begin{cases} x_{is}^2 = \sqrt[3]{\dfrac{d_i}{2}}, i = 1,...,n \\ d_i^1 = \sqrt[3]{\left(\dfrac{d_i}{2}\right)^2}, x_{is}^{3,4} = -\sqrt[3]{\dfrac{d_i}{2}}, \quad i = 1,...,n \end{cases} \quad (15)$$

The stability properties of the stationary states (13) and (15) are examined within a gradient-based framework employing Lyapunov vector functions. System (11) is considered as a gradient system, for which the following relation holds: $\frac{dx_i}{dt} = -\frac{\partial V_i(x)}{\partial x}, i = 1,...,n$, where $V(x) = \left(V_1\left(x_1,...,x_n\right),...,V_n\left(x_1,...,x_n\right)\right)$ denotes the Lyapunov vector function.

The stability of the stationary state (13) of model (11) is evaluated by enforcing positive definiteness of the Lyapunov vector function *V(x)*. This leads to a set of inequalities that define the conditions for aperiodic robust stability:

$$\begin{cases} -(d_1 + a_{21} + a_{31} + ... + a_{n1}) > 0 \\ -(a_{12} + d_2 + a_{23} + ... + a_{n2}) > 0 \\ -(a_{13} + a_{23} + d_3 + ... + a_{n3}) > 0 \\ \quad ... \\ -(a_{1n} + a_{2n} + a_{3n} + ... + d_n) > 0 \end{cases} \quad (16)$$

Thus, inequalities (16) define the parameter region in which the stationary state (13) remains aperiodically stable.

The stability of the stationary state (15) is evaluated using the same approach. For this purpose, system (11) is rewritten in deviation variables relative to the stationary state (15), resulting in the transformed system:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_1^4 - 4\sqrt[3]{\dfrac{d_1}{2}x_1^3} - 3\sqrt[3]{\left(\dfrac{d_1}{2}\right)^2}x_1^2 - d_1x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \ldots + a_{1n}x_n \\ \dot{x}_2 = -x_2^4 - 4\sqrt[3]{\dfrac{d_2}{2}x_2^3} - 3\sqrt[3]{\left(\dfrac{d_2}{2}\right)^2}x_2^2 - d_2x_2 + a_{21}x_1 + a_{23}x_3 + \ldots + a_{2n}x_n \\ \quad ... \\ \dot{x}_n = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + ... - x_n^4 - 4\sqrt[3]{\dfrac{d_n}{2}}x_n^3 - 3\sqrt[3]{\left(\dfrac{d_n}{2}\right)^2}x_n^2 - d_nx_n \end{cases} \quad (17)$$

The requirement of positive definiteness of the Lyapunov vector function *V(x)* leads to the conditions ensuring aperiodic robust stability of the model in deviation form (17). These conditions can be expressed as

$$\begin{cases} d_1 - a_{21} - a_{31} - ... - a_{n1} > 0 \\ d_2 - a_{22} - a_{32} - ... - a_{n2} > 0 \\ d_3 - a_{13} - a_{23} - ... - a_{n3} > 0 \\ \quad ... \\ d_n - a_{1n} - a_{2n} - ... - a_{n-1,n} > 0 \end{cases} \quad (18)$$

Thus, inequalities (18) define the parameter region in which the stationary state (15) remains aperiodically stable.

Model (11) remains stable over a wide range of parameter variations $d_i, i = 1,...,n$, which confirms its self-organizing property. It follows that under conditions (16), the stationary state (13) exists and is stable, while under conditions (18), the stationary state (15) becomes aperiodically robustly stable. The transition between these states occurs through a bifurcation mechanism.

Simultaneous stability of states (13) and (15) is not observed, which follows from the structural characteristics of two-parameter mappings. This feature provides a basis for constructing self-organizing models that exclude unstable regimes and eliminate chaotic dynamics.

The determination of controller coefficients for a self-organizing control system is addressed for linear objects with multiple inputs and outputs within the framework of two-parameter structurally stable mappings.

The proposed approach relies on ensuring consistency between the aperiodic robust stability conditions of the control system and those of the self-organizing model with prescribed transient characteristics. In this framework, the desired performance is determined from simulation of the self-organizing model.

To ensure the transfer of dynamic properties from the model to the control system, the stability conditions of the control system (8), (10) are equated to the stability conditions of the model (16), (18). This yields the following system of equations obtained by equating (8) and (16):

$$\begin{cases} -(b_{11}k_1 + a_{11} + a_{21} + a_{31} +,...,+a_{n1}) = -(d_1 + a_{21} + a_{31} +,...,+a_{n1}) \\ -(a_{12} + b_{22}k_2 + a_{22} + a_{32} +,...,+a_{n2}) = -(a_{12} + d_2 + a_{32} +,...,+a_{n2}) \\ -(a_{13} + a_{23} + b_{33}k_3 + a_{33} +,...,+a_{n3}) = -(a_{13} + a_{23} + d_3 +,...,+a_{n3}) \\ \quad ... \\ -(a_{1n} + a_{2n} + a_{3n} +,...,+b_{nn}k_n + a_{nn} = -(a_{1n} + a_{2n} + a_{3n} +,...,+d_n) \end{cases} \quad (19)$$

Similarly, by equating (10) and (18), the controller parameters are obtained as:

$$\begin{cases} b_{11}k_1 - a_{11} - a_{21} - a_{31} -,\ldots,-a_{n1} = d_1 - a_{21} - a_{31} -,\ldots,-a_{n1} \\ -a_{12} + b_{22}k_2 - a_{22} - a_{32} -,\ldots,-a_{n2} = -a_{12} + d_2 - a_{32} -,\ldots,-a_{n2} \\ -a_{13} - a_{23} + b_{33}k_3 - a_{33} -,\ldots,-a_{n3} = -a_{13} - a_{23} + d_3 -,\ldots,-a_{n3} \\ \ldots \\ -a_{1n} - a_{2n} - a_{3n} -,\ldots,+b_{nn}k_n - a_{nn} = -a_{1n} - a_{2n} - a_{3n} -,\ldots,+d_n \end{cases} \quad (20)$$

By matching the corresponding terms of systems (19) and (20), the controller coefficients for the self-organizing MIMO control system within the class of two-parameter structurally stable mappings can be determined as

$$k_1 = \frac{d_1 + a_{11}}{b_{11}}, k_2 = \frac{d_2 + a_{22}}{b_{22}}, k_3 = \frac{d_3 + a_{33}}{b_{33}}, \ldots, k_n = \frac{d_n + a_{nn}}{b_{nn}} \quad (21)$$

Thus, the synthesis problem admits a unique solution. The resulting self-organizing control system ensures the desired control performance while preserving aperiodic transient behavior.

At the same time, the proposed approach eliminates the occurrence of deterministic chaotic regimes and prevents the formation of undesirable dynamic behaviors, such as strange attractors, by restricting the system operation to the admissible stability regions.

Results and Discussion

The results of the study show that the closed-loop system (3) possesses regions of aperiodic robust stability defined by the system of inequalities (8). Within these regions, the stationary state (5) remains stable under variations of uncertain parameters, and the transient responses exhibit a non-oscillatory (aperiodic) behavior.

Violation of conditions (8) leads to a loss of stability of the stationary state (5). As a consequence, new stationary states (7) arise, as defined by equation (6). When conditions (10) are satisfied, these states remain aperiodically stable.

Thus, variation of system parameters causes a bifurcation transition between stationary states, which reflects the self-organization process. In this case, the system automatically transitions to a new stable regime without the occurrence of oscillatory or chaotic behavior.

The analysis of the self-organizing model (11) shows that its stationary states (13) and (15) are determined by equations (12) and (14), while the corresponding stability regions are defined by conditions (16) and (18). The comparison of stability conditions for the model and the control system makes it possible to formulate a controller synthesis procedure.

Equating the stability conditions (8) and (16), as well as (10) and (18), leads to the systems of equations (19) and (20), the solution of which yields expression (21) for the controller parameters. This ensures the transfer of the desired transient characteristics from the model to the control system.

The obtained results confirm that the proposed method provides the formation of regions of aperiodic robust stability, the existence of multiple stationary states, and a controlled transition between them under parameter variations.

Conclusion

The paper introduces a method for constructing self-organizing control systems for multidimensional linear objects based on two-parameter structurally stable mappings. The analysis is carried out within a Lyapunov vector function framework, allowing the formulation of stability criteria in terms of parameter-dependent constraints. These constraints define regions in which the system maintains non-oscillatory and robust behavior despite parameter variations.

It has been shown that the proposed approach ensures the formation of aperiodic transient responses with monotonic convergence to equilibrium states. In addition, the method describes the mechanism of transitions between stable states through bifurcations, which reflects the self-organizing properties of the system.

The use of two-parameter structurally stable mappings and catastrophe theory makes it possible to eliminate the development of unstable and chaotic regimes, including deterministic chaos.

A procedure for matching the stability conditions of the model and the control system has been developed, allowing the controller parameters to be uniquely determined and ensuring the desired performance characteristics.

The obtained results extend the capabilities of robust control system synthesis and can be applied to the design of complex technical systems operating under uncertainty.

REFERENCES

1 **Khalil, H. K.** Nonlinear Systems. – 3rd ed. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002.

2 **Sastry, S.** Nonlinear Systems : Analysis, Stability, and Control. – New York : Springer, 2013. – https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3108-8

3 **Zhou, K., Doyle, J., Glover, K.** Robust and Optimal Control. – New Jersey : Prentice Hall, 1996.

4 **Nussupbek, Zh. T., Bekenov, T. N., Sattinova, Z. K., Beisenbi, M. A., Tassybekov, Zh. T.** Substantiation of methods for calculation of traction forces redistribution indicators on modular front and rear wheels of the vehicle.

Transportation Engineering, – 2023, Vol. 13, – Article 100193. – https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100193

5 **Kuznetsov, Y. A.** Elements of Applied Bifurcation Theory. – Springer, 2023. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-22007-4

6 **Бейсенби, М. А.** Исследование робастной устойчивости систем автоматического управления методом функций А. М. Ляпунова. – Астана, 2015. – 204 с.

7 **Бейсенби, М. А**. Управляемый хаос в развитии экономической системы. Нур-Султан, 2019 – 168 с.

8 **Poston, T., Stewart, I.** Catastrophe Theory and Its Applications. – Dover, 2014.

9 **Nicolis, G., Prigogine, I.** Self-Organization in Nonequilibrium Systems. – Wiley, 2017.

10 **Beisenbi, M., Sagymbay, A., Satybaldina, D., Kissikova, N.** Velocity Gradient Method of Lyapunov Vector Functions // Proc. Int. Conf. – 2019. – https://doi.org/10.1145/3312714.3312724

11 **Beisenbi, M., Temirbek, A., Ostayeva, A., Suleimenova, S.** Synthesis of a Gradient-Velocity Control System // Journal of the Balkan Tribological Association. – 2022.

12 **Abdiramanov, O., Taiman, D., Beisenbi, M., et al.** Self-Organizing Control Systems for Nonlinear Spacecraft // IJACSA. – 2023. – https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0141179

13 **Beisenbi, M., Beisembina, S., Satpayeva, A.** Synthesis of a Control System of a Deterministic Chaotic Process // Proc. Int. Conf. – 2021.

14 **Beisenbi, M., Abdrakhmanova, L.** Design of Control System in Structurally Stable Mappings // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.799-800.1137

15 **Beisenbi, M., Beisembina, S., Satpayeva, A.** Synthesis of a control system of a deterministic chaotic process in the class of two-parameter structurally stable mappings. – Istanbul, 2021. – Vol. 3. – P. 171–175.

16 **Milnor, J. W.** Morse Theory. – Princeton University Press, 1963.

17 **Beisenbi, M., Kalieva, C., Turmagambetova, M., Muratzhanova, H.** Synthesis of the control systems by the state of an object with single input and single output by a gradient-velocity method of vector A.M. Lyapunov functions // Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Technical Science and Technology Series. – 2018. – Vol. 122, No. 1. – P. 29–33. – https://doi.org/10.32523/2616-7263-2018-122-1-29-33

18 **Поляк, Б. Т., Щербаков, П. С.** Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002. – 303 с.

19 **Beisembina, S., Beisenbi, M., Issatayeva, G.** Managing Short-Term Oscillations and Fluctuations by Macroeconomic Model // Journal of the Knowledge Economy. – 2025. – Vol. 16, No. 4. – P. 15260–15285. – https://doi.org/10.1007/s13132-024-02549-w

REFERENCES

1 **Khalil, H. K.** Nonlinear Systems. – 3rd ed. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

2 **Sastry, S.** Nonlinear Systems: Analysis, Stability, and Control. – New York: Springer, 2013. – https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3108-8

3 **Zhou, K., Doyle, J., Glover, K.** Robust and Optimal Control. – New Jersey : Prentice Hall, 1996.

4 **Nussupbek, Zh. T., Bekenov, T. N., Sattinova, Z. K., Beisenbi, M. A., Tassybekov, Zh. T.** Substantiation of methods for calculation of traction forces redistribution indicators on modular front and rear wheels of the vehicle. Transportation Engineering, – 2023, Vol. 13, – Article 100193. – https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100193

5 **Kuznetsov, Y. A.** Elements of Applied Bifurcation Theory. – Springer, 2023. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-22007-4

6 **Beisenbi, M. A.** Issledovanie robastnoy ustoychivosti sistem avtomaticheskogo upravleniya metodom funktsiy A.M. Lyapunova [Investigation of robust stability of automatic control systems using the Lyapunov function method]. – Astana, 2015, 204 p.

7 **Beisenbi, M. A.** Upravlyaemyy khaos v razvitii ekonomicheskoy sistemy [Controlled chaos in the development of an economic system]. Nur-Sultan, 2019, 168 p.

8 **Poston, T., Stewart, I.** Catastrophe Theory and Its Applications. – Dover, 2014.

9 **Nicolis, G., Prigogine, I.** Self-Organization in Nonequilibrium Systems. – Wiley, 2017.

10 **Beisenbi, M., Sagymbay, A., Satybaldina, D., Kissikova, N.** Velocity Gradient Method of Lyapunov Vector Functions // Proc. Int. Conf. – 2019. – https://doi.org/10.1145/3312714.3312724

11 **Beisenbi, M., Temirbek, A., Ostayeva, A., Suleimenova, S.** Synthesis of a Gradient-Velocity Control System // Journal of the Balkan Tribological Association. – 2022.

12 **Abdiramanov, O., Taiman, D., Beisenbi, M., et al.** Self-Organizing Control Systems for Nonlinear Spacecraft // IJACSA. – 2023. – https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0141179

13 **Beisenbi, M., Beisembina, S., Satpayeva, A.** Synthesis of a Control System of a Deterministic Chaotic Process // Proc. Int. Conf. – 2021.

14 **Beisenbi, M., Abdrakhmanova, L.** Design of Control System in Structurally Stable Mappings // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.799-800.1137

15 **Beisenbi, M., Beisembina, S., Satpayeva, A.** Synthesis of a control system of a deterministic chaotic process in the class of two-parameter structurally stable mappings. – Istanbul, 2021. – Vol. 3. – P. 171–175.

16 **Milnor, J. W.** Morse Theory. – Princeton University Press, 1963.

17 **Beisenbi, M., Kalieva, C., Turmagambetova, M., Muratzhanova, H.** Synthesis of the control systems by the state of an object with single input and single output by a gradient-velocity method of vector A.M. Lyapunov functions // Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Technical Science and Technology Series. – 2018. – Vol. 122, No. 1. – P. 29–33. – https://doi.org/10.32523/2616-7263-2018-122-1-29-33

18 **Polyak, B.T., Shcherbakov, P.S.** Robastnaya ustoychivost i upravlenie [Robust stability and control]. Moscow : Nauka, 2002, 303 p.

19 **Beisembina, S., Beisenbi, M., Issatayeva, G.** Managing Short-Term Oscillations and Fluctuations by Macroeconomic Model // Journal of the Knowledge Economy. – 2025. – Vol. 16, No. 4. – P. 15260–15285. – https://doi.org/10.1007/s13132-024-02549-w

Received 20.04.26.
Received in revised form 29.04.26.
Accepted for publication 31.08.26.

*М. А. Бейсенбі[1], *Н. Б. Шамкен[2], Т. Н. Бекенов[3]*
[1,2,3]Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана.
20.04.26 ж. баспаға түсті.
29.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

MIMO ЖҮЙЕЛЕРІ ҮШІН ӨЗІН-ӨЗІ ҰЙЫМДАСТЫРАТЫН БАСҚАРУДЫ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ТҰРАҚТЫ БЕЙНЕЛЕУЛЕР НЕГІЗІНДЕ СИНТЕЗДЕУ

Бұл жұмыстың мақсаты – m-кірісі және n-шығысы бар сызықтық объектілер үшін екі параметрлі құрылымдық тұрақты бейнелеулер класында өзін-өзі ұйымдастыратын басқару жүйесін синтездеу әдісін әзірлеу болып табылады. Ұсынылған тәсіл Ляпуновтың вектор-функцияларының градиентті-жылдамдық әдісіне негізделген. Стационарлық күйлердің апериодтық робастты орнықтылығының шарттары параметрлердің өзгеруінің рұқсат етілген аймақтарын анықтайтын параметрлік теңсіздіктер жүйесі түрінде алынған. Жүйе параметрлеріне байланысты орнықты күйлер арасындағы ауысулар бифуркациялар нәтижесінде жүзеге асатыны және бұл өзін-өзі ұйымдастырудың көрінісі ретінде қарастырылатыны көрсетілген. Берілген өтпелі сипаттамалары бар өзін-өзі ұйымдастыратын модельді таңдау процедурасы, сондай-ақ модель мен басқару жүйесінің орнықтылық шарттарын сәйкестендіру негізінде реттегіш коэффициенттерін есептеу әдісі ұсынылған. Жұмыстың ғылыми жаңалығы апериодтық өтпелі процестерді, параметрлік анықталмағандық жағдайындағы робасттылықты және тербелмелі әрі хаостық режимдерді басуды қамтамасыз ететін біртұтас синтез әдісін әзірлеуде болып табылады.

Кілтті сөздер: өзін-өзі ұйымдастыру, MIMO жүйелері, бифуркация, Ляпунов әдісі, робастты тұрақтылық, құрылымдық тұрақты бейнелеулер.

*М. А. Бейсенби[1], *Н. Б. Шамкен[2], Т. Н. Бекенов[3]*
[1,2,3]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилёва,
Республика Казахстан, Астана.
Поступило в редакцию 20.04.26.
Поступило с исправлениями 29.04.26.
Принято в печать 31.08.26.

СИНТЕЗ САМООРГАНИЗУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ MIMO-СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО УСТОЙЧИВЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ

Целью данной работы является разработка метода синтеза самоорганизующейся системы управления для линейных объектов с m-входами и n-выходами в классе двухпараметрических структурно устойчивых отображений. Предложенный подход основан на градиентно-скоростном методе вектор-функций Ляпунова. Получены условия апериодической робастной устойчивости стационарных состояний в виде систем параметрических неравенств, определяющих допустимые области изменения параметров. Показано, что переходы между устойчивыми состояниями могут происходить в результате бифуркаций, что интерпретируется как проявление самоорганизации. Разработана процедура выбора самоорганизующейся модели с заданными переходными характеристиками, а также метод вычисления коэффициентов регулятора на основе согласования условий устойчивости модели и системы управления. Научная новизна работы заключается в разработке единого подхода к синтезу, обеспечивающего апериодический характер переходных процессов, робастность при параметрической неопределённости и подавление колебательных и хаотических режимов.

Ключевые слова: самоорганизация; MIMO системы; бифуркация; метод Ляпунова; робастная устойчивость; структурно устойчивые отображения.

SRSTI 44.39.29

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/181-197

Zh. Bekbolatova[1], D. V. Grigoryev[2], A. Nurymov[3], Zh. Kuatzhanov[4]

[1,2,3,4]K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Republic of Kazakhstan, Almaty.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8219-6400

[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5593-9986

[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3364-1107

[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-0757-1316

*e-mail: zh.bekbolatova@satbayev.university

INTELLIGENT FORECASTING OF RENEWABLE GENERATION FOR DEFICIT REDUCTION AND GRID STABILITY

The increasing penetration of variable renewable energy sources creates new challenges for regional power systems characterized by structural electricity deficits and dependence on external power transfers. This paper develops an intelligent forecasting framework for wind and solar power generation aimed at supporting power balance assessment and grid stability analysis in the Almaty region of Kazakhstan. The proposed approach combines historical meteorological data, renewable generation profiles, and machine-learning algorithms to forecast variable renewable energy output under different operating conditions. Forecasting models based on time-series analysis and machine-learning techniques are evaluated using standard accuracy indicators, including RMSE, MAE, and MAPE. The forecasted renewable generation is further integrated into a regional power balance assessment to estimate its potential contribution to reducing electricity deficit and supporting operational planning. The results demonstrate that intelligent forecasting can improve the predictability of renewable generation, reduce uncertainty in dispatch decisions, and provide a data-driven basis for renewable energy integration in deficit-prone power systems. The study contributes to the development of practical forecasting tools for emerging power systems with growing shares of renewable energy.

Keywords: intelligent forecasting, Renewable energy forecasting, variable renewable energy, wind power forecasting, machine learning, artificial intelligence.

Introduction

The rapid expansion of variable renewable energy sources is changing the operational logic of modern power systems. Wind and solar generation are no longer marginal technologies added at the edge of the grid; in many countries, they are becoming central components of generation adequacy, investment planning, and power system security. However, their technical value depends not only on installed capacity, but also on the ability of system operators to anticipate their output with sufficient accuracy. Unlike conventional thermal units, wind and solar power plants are governed by meteorological variability, which introduces uncertainty into generation scheduling, reserve allocation, voltage control, and transmission planning [1; 2]. This challenge is particularly important for power systems where renewable energy development is occurring in parallel with structural regional imbalances. Kazakhstan represents such a case. The national power system remains strongly dependent on thermal generation, while renewable energy is growing steadily. By the end of 2024, Kazakhstan had 157 renewable energy facilities with a total installed capacity of 3,038.6 MW, including 1,525.7 MW of wind power plants, 1,216.6 MW of solar power plants, 295.2 MW of small hydropower plants, and 1.1 MW of bioelectric power plants. Renewable generation reached 7.55 billion kWh in 2024, corresponding to 6.4 % of total electricity production [3]. Although this share remains modest compared with long-term decarbonization targets, the increasing penetration of weather-dependent generation already requires more advanced tools for forecasting and operational planning.

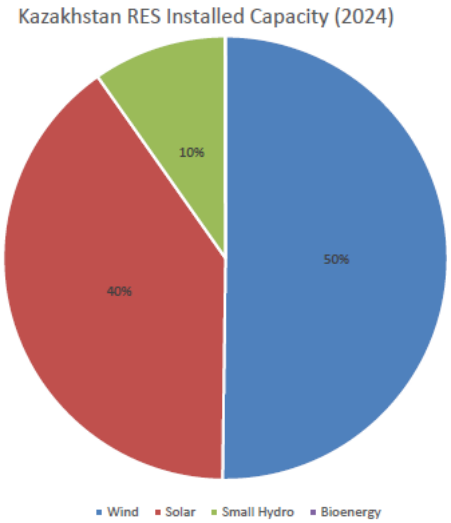


Figure1 – RES Installed Capacity [3]

The regional dimension of this problem is essential. Kazakhstan's electricity system is characterized by a spatial mismatch between generation and consumption. Large conventional power plants are concentrated mainly in the northern part of the country, while the southern regions experience increasing electricity demand and dependence on power transfers. In 2024, national electricity consumption increased by 4.3 % and reached 119,995.5 million kWh, while electricity consumption in the Southern zone increased by 5.6 % compared with 2023 [3]. In 2025, this trend continued: total electricity consumption reached 124,606.5 million kWh, and the Southern zone accounted for 30,641.0 million kWh, or 24.6 % of national consumption [4]. These figures indicate that the southern part of the system is not merely a passive load area, but a structurally important region for future adequacy and flexibility planning.

Almaty region is one of the most relevant examples of this transition. The region combines growing electricity demand, proximity to major load centers, and significant renewable energy potential. As of 2025, Almaty region had 23 operating renewable energy facilities with a combined installed capacity of 328.1 MW, including 8 hydropower plants with 25.78 MW, 9 wind power plants with 142 MW, and 6 solar power plants with 160.365 MW [5]. This resource base creates an opportunity to reduce regional dependence on external electricity supply. At the same time, the variability of wind speed, solar irradiation, cloud cover,

ambient temperature, and seasonal demand patterns makes renewable generation difficult to use as a firm planning resource without reliable forecasting.

For this reason, renewable energy forecasting should be treated not as an auxiliary data-processing task, but as a core element of power system operation and planning. Accurate forecasting of wind and solar generation improves day-ahead scheduling, reduces balancing costs, supports reserve management, and helps system operators evaluate possible deviations between load and renewable output. Recent studies show that machine-learning-based forecasting models can capture nonlinear relationships between meteorological variables and renewable power output more effectively than purely linear statistical methods, especially when historical generation data, weather variables, and temporal features are jointly considered [6]. Nevertheless, many forecasting studies remain focused on model accuracy alone and do not sufficiently connect forecasting results with regional power balance, import dependency, and grid stability indicators.

This paper addresses this gap by developing an intelligent forecasting based on random forest method with framework for wind and solar power generation in the Almaty region of Kazakhstan. The proposed approach combines meteorological data, historical renewable generation profiles, and machine-learning techniques to forecast variable renewable energy output.

Materials and methods

Research design

This study develops an intelligent forecasting framework for estimating variable renewable energy generation in the Almaty region of Kazakhstan and linking the forecasted output to regional power balance assessment. The methodological design follows the logic that renewable energy forecasting should not be treated only as a statistical prediction problem, but as an operational tool for power system planning. In a deficit-prone region, the practical value of a forecast is determined by its ability to reduce uncertainty in dispatch, reserve planning, import dependency, and grid stability evaluation.

The proposed framework consists of four main stages. First, meteorological, renewable generation, and power system data are collected and harmonized. Second, statistical and machine-learning forecasting models are developed for wind generation. Third, the forecasting performance is evaluated using standard accuracy indicators. Finally, the predicted renewable generation is incorporated into a regional power balance model to assess the contribution of wind and solar power to deficit reduction.

Study area and power system context

The Almaty region was selected as the case study because it combines three important characteristics: growing electricity demand, limited local generation

capacity, and significant potential for wind power development. These conditions make the region a suitable test case for evaluating the operational role of renewable energy forecasting in a structurally constrained power system.

Unlike regions with abundant conventional generation, the Almaty region depends partly on electricity transfers from other parts of the national power system. Therefore, the integration of variable renewable energy sources must be assessed not only in terms of installed capacity, but also in terms of hourly availability, seasonal variability, forecast uncertainty, and their effect on the regional power balance. This is particularly relevant for wind generation, whose output depends strongly on meteorological conditions and cannot be dispatched in the same way as conventional thermal units [7; 8; 9; 10].

Mathematical model for solar generation:

$$P_{PV,t} = \eta_{PV} * A_{PV} * G_{,t} * [1 - \beta(T_{cell,t} - T_{ref,t})] \quad (1)$$

where:

$P_{PV,t}$ – the power of the solar station at time t,
η_{PV} – efficiency of photovoltaic modules
A_{PV} – area of PV modules
$G_{,t}$ – solar irradiation
β – temperature coefficient
$T_{cell,t}$– PV panel temperature
T_{ref} – temperature

For wind generation:

$$P_{W,t} = \begin{cases} 0, & v_t < v_{ci} \\ P_r \dfrac{v_t^3 - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3}, & v_{ci} < v_t < v_r \\ P_r, & v_r < v_t < v_{co} \\ 0, & v_t < v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

where:

v_t – wind speed,
v_{ci} – cut-in speed
v_r – rated speed
v_{co} – cut out speed
P_r – nominal power of wind turbine

Random forest method

The Random Forest method [11] was applied as a machine-learning approach for forecasting wind power generation based on historical meteorological and operational data. Wind power generation is highly dependent on meteorological

conditions and shows a nonlinear relationship with wind speed, wind direction, air density, temperature, and atmospheric pressure.

The accuracy of the model was assessed using statistical error indicators such as Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and the coefficient of determination (R^2). These indicators allow evaluation of how closely the predicted values correspond to the actual measured wind power generation.

$$\text{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

$$\text{MAE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

$$\text{MAX}=max|y_i-\hat{y}_i| \quad (5)$$

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2} \quad (6)$$

where n=1,2,…n; -actual values; $\hat{y}_i$ – predicted values, n-number of validation

In this study, the Random Forest method is used to forecast wind power output because it can effectively capture nonlinear dependencies between input variables and generated power without requiring strict assumptions about the statistical distribution of the data.

$$P_{W.t}^{forecast} = f_{RF}(v_t, d_t, T_t, p_t, H_t, P_{w,t-1}) \quad (7)$$

Random forest based wind power forecasting model

The proposed model is a data-driven framework for forecasting wind power generation under variable meteorological conditions. It combines time-series weather data, historical renewable generation, Random Forest regression, scenario generation, and power system analysis.

At the input stage, the model uses wind speed, wind direction, temperature, humidity, atmospheric pressure, and previous wind and solar generation values. These variables are preprocessed through data cleaning, missing value treatment, outlier detection, normalization, and train-test splitting.

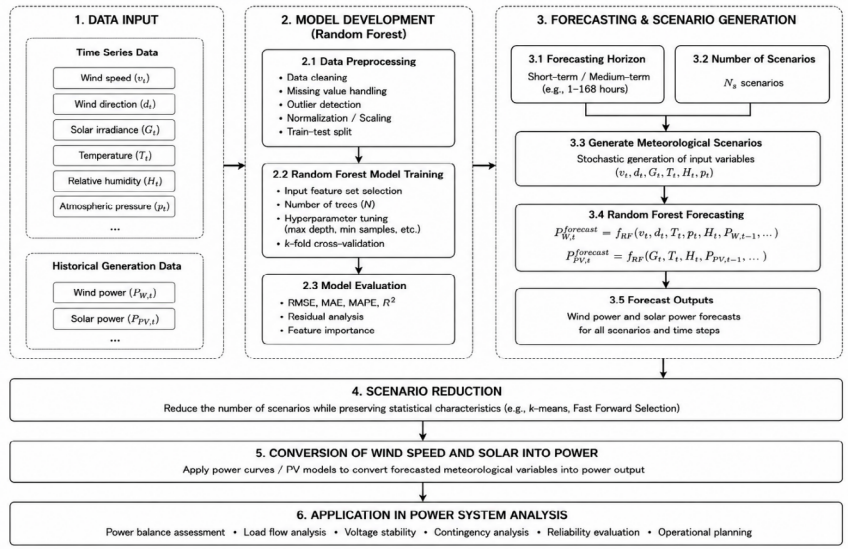


Figure 2 – Overall model

The figure shows multiple regression trees. Each tree learns a different relationship between meteorological variables and renewable power output. The final forecast is obtained by averaging the outputs of all trees, which improves robustness and reduces overfitting.

Results and discussion

To understand the objective patterns underlying the process of formation and development of personal and professional competencies of social workers through advanced training courses, it is necessary to clearly understand their model [12; 13].

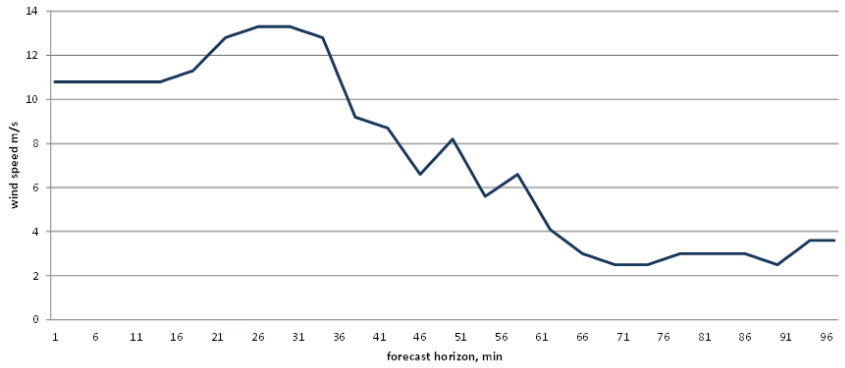


Figure 3 – Historical wind speed [14]

At previous research the wind speed forecast was investigated by Auto-regressive moving average method (ARMA) in [14].

Using the same historical data, we apply random forest method in order to evaluate the accuracy of this method.

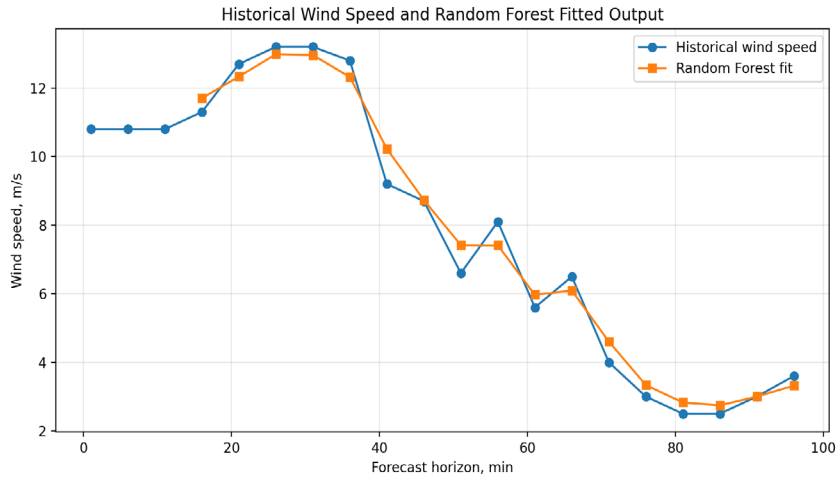


Figure 4 – Prediction using random forest method

The Random Forest model reproduces the main dynamics of the historical wind-speed profile with reasonable accuracy. The model captures the initial stable

wind regime, the increase to the peak value of about 13 m/s, the subsequent rapid decline, and the low-wind period near the end of the forecast horizon. Minor deviations appear during sharp local fluctuations, which is expected for an ensemble model that tends to smooth short-term variability.

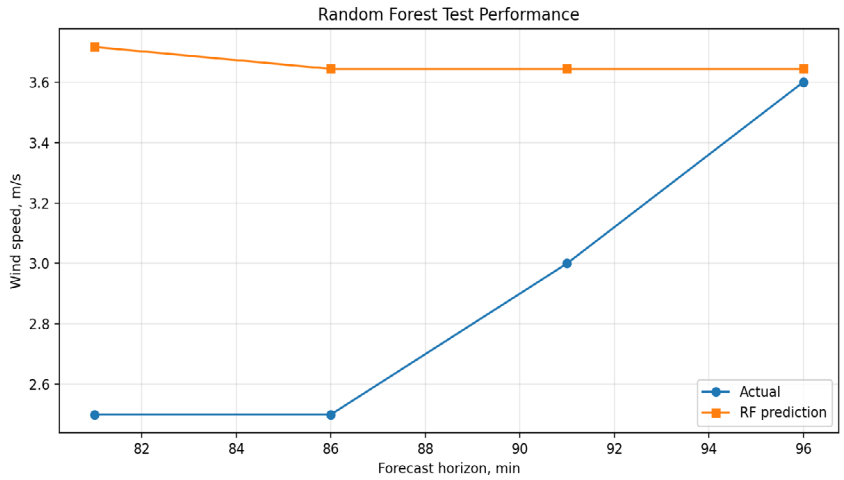


Figure 5 – Random forest test performance

The Figure-5 show that the Random Forest model captures the general low-wind regime but overestimates the actual wind speed during the final forecast interval. While the observed values increase from about 2.5 to 3.6 m/s, the model prediction remains nearly constant at around 3.6–3.7 m/s. This indicates that the model smooths short-term variations and is less sensitive to rapid changes when only a limited historical dataset is used. From a power-system perspective, such overestimation is important because it may lead to an optimistic assessment of available wind generation.

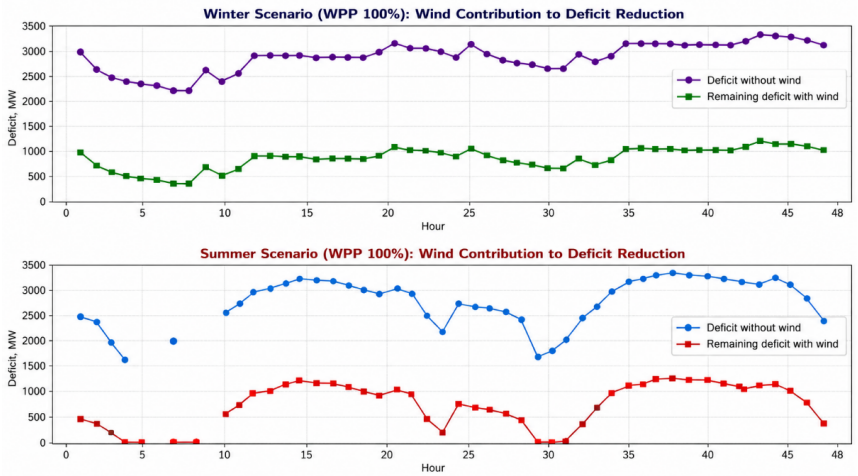


Figure 6 – Wind contribution to deficit reduction

The graphs compare the regional electricity deficit before and after the integration of wind power under the 100 % WPP scenario for winter and summer operating conditions. In the winter scenario, the deficit without wind remains high throughout the analyzed 48-hour period, generally ranging between 2,500 and 3,300 MW. After wind generation is included, the remaining deficit decreases substantially, mostly to the range of 500–1,200 MW. This indicates that wind power provides a significant contribution to deficit reduction, although it does not fully eliminate the winter deficit. In the summer scenario, the impact of wind power is even more visible. The deficit without wind varies strongly over time and reaches more than 3,000 MW during several hours. With wind generation included, the remaining deficit is sharply reduced and, in some hours, approaches zero. This shows that wind power can cover a considerable part of the regional shortage during favorable operating conditions.

Financing information

This work has been supported financially by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, grant number of the research project IRN AP25796241 “Development of an intelligent renewable energy forecasting tool to solve the electricity shortage and network stability in the Almaty”, which is gratefully acknowledged by the author

Conclusions

The analysis of the generation scenarios demonstrates that wind power has a substantial and quantifiable impact on the regional power balance of the Almaty

region. Across both winter and summer operating conditions, higher wind power penetration consistently reduces the remaining supply deficit and improves the balance between local generation and regional demand.

In the winter case, the system remains structurally constrained even under high wind availability. When WPP output increases from 20 % to 100 %, the average remaining deficit decreases from approximately 1517 MW to 942 MW. This corresponds to an average deficit reduction of about 68 %. The result is technically significant: wind generation materially improves adequacy, but it does not fully close the winter supply gap. This reflects the combined effect of high seasonal demand, limited dispatchable local generation, and the variability of renewable output.

The summer case shows a similar but slightly more favorable pattern. The average remaining deficit declines from approximately 1342 MW under the 20 % WPP scenario to about 845 MW under the 100 % WPP scenario. The average deficit reduction reaches approximately 65 %. In several hours, the remaining deficit approaches zero, indicating that wind power can temporarily provide a major contribution to regional self-sufficiency when weather conditions are favorable.

From a power engineering perspective, the results lead to an important conclusion: wind power is not merely an additional energy source, but a strategic resource for reducing regional import dependency and improving operational adequacy. However, the persistence of a residual deficit under all scenarios confirms that wind generation alone cannot guarantee full supply security. Its variability requires complementary flexibility resources, including battery energy storage, fast-ramping conventional generation, demand-side response, reserve capacity, and accurate short-term forecasting.

Therefore, the integration of wind power in the Almaty region should be planned as part of a coordinated system strategy rather than as an isolated capacity expansion measure. The most reliable pathway is the combined deployment of wind generation, storage, forecasting tools, and grid reinforcement. Such an approach would allow renewable energy to contribute not only to decarbonization, but also to regional adequacy, operational reliability, and long-term energy security.

REFERENCES

1 International Energy Agency (IEA). Integrating Solar and Wind in Southeast Asia. IEA. – Paris, 2025. [Electronic resource]. – Available at: https://www.iea.org/reports/integrating-solar-and-wind-in-southeast-asia. (Accessed 20.07.2026).

2 International Renewable Energy Agency (IRENA), System Operation. – Abu Dhabi, 2020. [Electronic resource]. – Available at: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_System_Operation_Collection_2020.pdf. (Accessed 16.07.2026).

3 АО Казахстанская компания по управлению электрическими сетями (KEGOC). Годовой отчет за 2024 год: Баланс электроэнергии. – Астана, 2025 год. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ar2023.kegoc.kz/ru/electricity-balance.html. (Дата обращения: 16.07.2026).

4 АО Казахстанская компания по управлению электрическими сетями (KEGOC), Национальная энергетическая система Казахстана. – Астана, 2025 год. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.kegoc.kz/en/electric-power/natsionalnaya-energosistema/. (Дата обращения 16.07.2026).

5 **Шайханов, А.** Развитие возобновляемой энергетики в Казахстане: переход от стимулов к ответственности // Qazaq Green. – 2026. – №16(20). – С. 16-21.

6 **Gaboitaolelwe, A. M., Zungeru, A. M., Yahya, A., Lebekwe C. K., Vinod D. N., Salau, A. O.** Machine Learning Based Solar Photovoltaic Power Forecasting : A Review and Comparison // IEEE. –2023. – Vol. 11. – P. 40820–40845. – https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3270041.

7 **Salman, H. A., Kalakesch, A., Steiti. A.** Random forest algorithm overview // Babylonian Journal of Machine Learning. – 2024. – P. 69–79. – https://doi.org/10.58496/BJML/2024/007.

8 **Benitez, I. B., Singh, J. G.** A comprehensive review of machine learning applications in forecasting solar PV and wind turbine power output //Journal of Electrical Systems and Information Technology. – 2025. – Vol. 12. – Article number: 54. – https://doi.org/10.1186/s43067-025-00239-4.

9 **Abuella, M., Chowdhury, B.** Random Forest ensemble of support vector regression models for solar power forecasting // IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference. – Washington, DC, 2017. – https://doi.org/10.1109/ISGT.2017.8086027.

10 **Belletreche, M., Bailek, N., Abotaleb, M., Bouchouicha, K., Zerouali, B., Guermoui, M., Kuriqi, A., Alharbi, A.H., Khafaga, D.S., El-Shimy, M., El-kenawy, E.S.M.** Hybrid attention-based deep neural networks for short-term wind power forecasting using meteorological data in desert regions // Scientific Reports. – 2024. – Vol.14. – Article number: 21842. – https://doi.org/10.1038/s41598-024-73076-6.

11 Rajaperumal, T.A., Columbus, C. Enhanced wind power forecasting using machine learning, deep learning models and ensemble integration // Scientific Reports. – 2025. – Vol.15. – Article number: 20572. – https://doi.org/ 10.1038/s41598-025-05250-3.

12 International Renewable Energy Agency (IRENA). Advanced Forecasting of Variable Renewable Power Generation: Innovation Landscape Brief. IRENA. – Abu Dhabi, 2020. [Electronic resource]. – Available at: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Advanced_weather_forecasting_2020.pdf (Accessed 16.07.2026).

13 International Renewable Energy Agency (IRENA). Innovation Landscape for a Renewable-Powered Future: Solutions to Integrate Variable Renewables. IRENA. – Abu Dhabi, 2019. [Electronic resource]. – Available at: https://www.irena.org/publications/2019/Feb/Innovation-landscape-for-a-renewable-powered-future (Accessed 16.07.2026).

14 **Bekbolatova, Z. K., Grigoryev D., Minazhova S., Bekbayev, Omarov Zh., Kozhageldi B.** Wind power forecasting based on time series autoregressive moving average model taking into account the effect of wind speed dispersion //ES Energy and Environment. – 2026. – Vol 31. – Article number: 2025. – https://doi.org/10.30919/ee2025.

REFERENCES

1 International Energy Agency (IEA). Integrating Solar and Wind in Southeast Asia. IEA. – Paris, 2025. [Electronic resource]. – Available at: https://www.iea.org/reports/integrating-solar-and-wind-in-southeast-asia. (Accessed 16.07.2026)

2 International Renewable Energy Agency (IRENA), System Operation. – Abu Dhabi, 2020. [Electronic resource]. – Available at: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_System_Operation_Collection_2020.pdf. (Accessed 16.07.2026)

3 JSC Kazakhstan Electricity Grid Operating Company (KEGOC). Godovoi otchet za 2024 god: Balans elektroenergii [Annual Report 2024: Electricity Balance]. – Astana, 2025. [Electronic resource]. – Available at: https://ar2023.kegoc.kz/ru/electricity-balance.html. (Accessed 16.07.2026)

4 JSC Kazakhstan Electricity Grid Operating Company (KEGOC). Natsional'naya energeticheskaya sistema Kazakhstana [National Power System of Kazakhstan]. – Astana, 2025. [Electronic resource]. – Available at: https://www.kegoc.kz/en/electric-power/natsionalnaya-energosistema/. (Accessed 16.07.2026)

5 **Shaikhanov, A.** Razvitie vozobnovlyaemoi energetiki v Kazakhstane: perekhod ot stimulov k otvetstvennosti [Renewable energy development in

Kazakhstan: transition from incentives to responsibility]. // Qazaq Green. – 2026. – №16(20). – P. 16-21

6 **Gaboitaolelwe, A.M., Zungeru, A M., Yahya, A., Lebekwe C. K., Vinod D. N., Salau, A. O.** Machine Learning Based Solar Photovoltaic Power Forecasting: A Review and Comparison // IEEE. –2023. – Vol. 11. – P. 40820-40845. – https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3270041

7 **Salman, H. A., Kalakesch, A., Steiti. A.** Random forest algorithm overview // Babylonian Journal of Machine Learning. – 2024. – P. 69–79. – https://doi.org/10.58496/BJML/2024/007.

8 **Benitez, I. B., Singh, J. G.** A comprehensive review of machine learning applications in forecasting solar PV and wind turbine power output //Journal of Electrical Systems and Information Technology. – 2025. – Vol. 12. – Article number: 54. – https://doi.org/10.1186/s43067-025-00239-4.

9 **Abuella, M., Chowdhury, B.** Random Forest ensemble of support vector regression models for solar power forecasting // IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference. – Washington, DC, 2017. – https://doi.org/10.1109/ISGT.2017.8086027.

10 **Belletreche, M., Bailek, N., Abotaleb, M., Bouchouicha, K., Zerouali, B., Guermoui, M., Kuriqi, A., Alharbi, A.H., Khafaga, D.S., El-Shimy, M., El-kenawy, E.S.M.** Hybrid attention-based deep neural networks for short-term wind power forecasting using meteorological data in desert regions // Scientific Reports. – 2024. – Vol.14. – Article number: 21842. – https://doi.org/10.1038/s41598-024-73076-6.

11 **Rajaperumal, T. A., Columbus, C.** Enhanced wind power forecasting using machine learning, deep learning models and ensemble integration // Scientific Reports. – 2025. – Vol.15. – Article number: 20572. – https://doi.org/ 10.1038/s41598-025-05250-3.

12 International Renewable Energy Agency (IRENA). Advanced Forecasting of Variable Renewable Power Generation: Innovation Landscape Brief. IRENA. – Abu Dhabi, 2020. [Electronic resource]. – Available at: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Advanced_weather_forecasting_2020.pdf (Accessed 16.07.2026).

13 International Renewable Energy Agency (IRENA). Innovation Landscape for a Renewable-Powered Future: Solutions to Integrate Variable Renewables. IRENA. – Abu Dhabi, 2019. [Electronic resource]. – Available at: https://www.irena.org/publications/2019/Feb/Innovation-landscape-for-a-renewable-powered-future (Accessed 16.07.2026).

14 **Bekbolatova, Z. K., Grigoryev D., Minazhova S., Bekbayev, Omarov Zh., Kozhageldi B.** Wind power forecasting based on time series

autoregressive moving average model taking into account the effect of wind speed dispersion //ES Energy and Environment. – 2026. – Vol 31. – Article number: 2025. – https://doi.org/10.30919/ee2025.

Received 10.07.26.
Received in revised form 30.07.26.
Accepted for publication 03.09.26.

**Ж. К. Бекболатова[1], Д. В. Григорьев[2], А. А. Нурымов[3], Ж. А. Куатжанов[4]*
[1,2,3,4]Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
10.07.26 ж. баспаға түсті.
30.07.26 ж. түзетулерімен түсті.
03.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖЭК ӨНДІРІСІН ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ БОЛЖАУ АРҚЫЛЫ ТАПШЫЛЫҚТЫ АЗАЙТЫП ЭЛЕКТР ЖҮЙЕСІНІН ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН АРТТЫРУ

Айнымалы жаңартылатын энергия көздерінің үлесінің артуы құрылымдық электр энергиясы тапшылығымен және сыртқы электр энергиясы ағындарына тәуелділігімен сипатталатын өңірлік энергетикалық жүйелер үшін жаңа сын-қатерлер туындатады. Бұл мақалада Қазақстанның Алматы өңірі мысалында қуат балансын бағалауды және электр желісінің тұрақтылығын талдауды қолдауға бағытталған жел және күн электр энергиясын өндіруді интеллектуалды болжау әдістемесі әзірленеді. Ұсынылған тәсіл әртүрлі жұмыс режимдерінде айнымалы жаңартылатын энергия көздерінен өндірілетін электр энергиясын болжау үшін тарихи метеорологиялық деректерді, жаңартылатын энергия өндіру профильдерін және машиналық оқыту алгоритмдерін біріктіреді. Уақыттық қатарларды талдау және машиналық оқыту әдістеріне негізделген болжау модельдері RMSE, MAE және MAPE сияқты стандартты дәлдік көрсеткіштері арқылы бағаланады. Бұдан әрі болжанған жаңартылатын энергия өндірісі өңірлік қуат балансына біріктіріліп, оның электр энергиясы тапшылығын төмендетуге және операциялық жоспарлауды қолдауға қосатын ықтимал үлесі

бағаланады. Нәтижелер интеллектуалды болжау жаңартылатын энергия өндірісінің болжамдылығын арттырып, диспетчерлік шешімдердегі белгісіздікті азайтып, электр энергиясы тапшылығы бар энергетикалық жүйелерде жаңартылатын энергия көздерін интеграциялау үшін деректерге негізделген әдістемелік негіз қалыптастыратынын көрсетеді. Зерттеу жаңартылатын энергия үлесі артып келе жатқан дәстүрлі энергетикалық жүйелер үшін қолданбалы болжау құралдарын дамытуға үлес қосады.

Кілтті сөздер: интеллектуалды болжау, жаңартылатын энергияны пайдалануды болжау, айнымалы жаңартылатын энергия, жел энергиясын пайдалануды болжау, Машиналық оқыту, жасанды интеллект.

**Ж. К. Бекболатова[1], Д. В. Григорьев[2],*
А. А.Нурымов[3], Ж. А. Куатжанов[4]
[1,2,3,4]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы.
Поступило в редакцию 10.07.26.
Поступило с исправлениями 30.07.26.
Принято в печать 03.09.26.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВИЭ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ДЕФИЦИТА И УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Растущее распространение различных возобновляемых источников энергии создает новые проблемы для региональных энергосистем, характеризующихся структурным дефицитом электроэнергии и зависимостью от внешних поставок электроэнергии. В данном документе разрабатывается интеллектуальная система прогнозирования для ветровой и солнечной энергетики, направленная на поддержку оценки энергетического баланса и анализа стабильности энергосистемы в Алматинском регионе Казахстана. Предлагаемый подход объединяет исторические метеорологические данные, профили возобновляемой генерации и алгоритмы машинного обучения для прогнозирования выработки энергии из возобновляемых источников в различных условиях эксплуатации. Модели прогнозирования, основанные на анализе временных рядов и методах машинного обучения, оцениваются с использованием стандартных показателей точности, включая RMSE, MAE и MAPE. Прогнозируемая возобновляемая генерация дополнительно интегрируется в оценку регионального энергетического баланса для оценки ее потенциального вклада в сокращение дефицита электроэнергии и поддержку оперативного планирования. Результаты показывают, что интеллектуальное прогнозирование может повысить предсказуемость возобновляемой генерации, снизить неопределенность при принятии диспетчерских решений и обеспечить основу для интеграции возобновляемых источников энергии в энергосистемы, подверженные дефициту энергии. Исследование способствует разработке практических инструментов прогнозирования для развивающихся энергосистем с растущей долей возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: интеллектуальное прогнозирование, прогнозирование использования возобновляемых источников энергии, переменная возобновляемая энергия, прогнозирование использования энергии ветра, машинное обучение, искусственный интеллект.

МРНТИ 70.94.19

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/198-213

В. В. Воронков[1], *И. М. Раделюк[2]

[1,2]Торайгыров университет,
Республика Казахстан, г. Павлодар.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4645-2884
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6067-3034
*e-mail: radelyuk.i@tou.edu.kz

РАЗРАБОТКА ГИБРИДИЗИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ВОДНОГО СЛЕДА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В данном исследовании представлены результаты разработки гибридной математической модели оптимизации, объединяющей принципы водной интеграции и качественно-количественной оценки водного следа для промышленных предприятий. Модель реализована в среде алгебраического программирования GAMS с использованием MILP подхода и применена к нефтеперерабатывающему заводу в Казахстане. Результаты моделирования показали существенное повышение эффективности водопользования. В частности, потребление свежей воды было снижено с 161,5 до 102,8 м³/ч (на 36,35 %), а объем образующихся сточных вод с 204,4 до 65,9 м³/ч (на 67,76 %). При этом общий водный след сократился с 365,9 до 25,2 USD/ч, что соответствует снижению на 93,11 %. Значительное уменьшение достигнуто как по количественному компоненту (–63,02 %), так и по качественному (–98,21 %), что обусловлено оптимизацией потоков и снижением концентраций загрязняющих веществ за счет формирования замкнутых контуров водооборота. Полученные результаты подтверждают, что интеграция методов водной интеграции и водного следа позволяет не только минимизировать водопотребление, но и учитывать экономические аспекты загрязнения. Предложенный гибридный подход может быть использован в качестве эффективного инструмента для повышения ресурсной эффективности и снижения экологической нагрузки на промышленных предприятиях.

Ключевые слова: водный след, повторное использование, водная интеграция, оптимизация водопотребления, гибридные модели.

Введение

Вода является одним из наиболее важных природных ресурсов, играющих ключевую роль в различной деятельности человека [1]. Промышленное производство выступает основным двигателем экономического роста, что сопровождается значительным потреблением водных ресурсов [2]. На мировом уровне доля забора пресной воды промышленными предприятиями составляет чуть менее 20 % [3]. Данный аспект усугубляется глобальным изменением климата и климатическими аномалиями, создающие дополнительную нагрузку на водные ресурсы [4]. По прогнозам Fujimori и др. (2016), представленным на основе анализа статистических данных 42 стран по 10 отраслям, к 2050 году глобальный промышленный водозабор составит от 461 до 1560 км³/год, а к 2100 году – от 196 до 1463 км³/год [5]. Также следует отметить, что в результате промышленной деятельности образуется огромное количество сточных вод, которые могут быть сильно загрязнены или содержать токсичные вещества [6]. Эта проблема не ограничивается развивающимися странами, поскольку даже развитые страны испытывают постоянную нехватку воды, усугубляемую загрязнением от промышленной деятельности. Особый вклад в ухудшения качества вод вносят такие отрасли, как нефтепереработка, текстильное производство, молочная промышленность, фармацевтика, лакокрасочная промышленность, кожевенная промышленность и целлюлозно-бумажная промышленность, являясь одними из крупнейших потребителей водных ресурсов, что приводит к значительным объемам сточных вод, содержащих различные загрязняющие вещества [7]. Вдобавок ко всему, отчет UN World Water Development (2024) показывает, что доля повторного использования водных ресурсов в конце производства по отношению к глобальному уровню составляет всего 19 % [8]. Из этого следует, что повышение эффективности использования промышленных водных ресурсов поспособствует не только экономии общего объёма водных ресурсов, но и снижению вреда, наносимого выбросами загрязняющих веществ окружающей среде [9].

В направлении оптимизации водопотребления было проведено немало исследований [10]. Большое внимание при этом уделялось моделям на основе анализа водных потоков в контексте производственной деятельности. Особую роль в этом послужили разработки, направленные на создание оптимальных конфигураций схем водопользования, что, впоследствии, послужило толчком для развития концепции водной интеграции (WI). WI представляет собой мощный инструмент, главными достоинствами которого выступают – сокращение потребления свежей воды и образования сточных вод, что достигается за счет повторного использования

отработанных потоков [11]. Тем не менее, большинство работ, связанных с оптимизацией схем водопотребления, упускали важность оценки качественно-количественных показателей водных потоков и системы в целом. Сточные воды, образующиеся в результате промышленной деятельности, оказывают значительное воздействие на водные экосистемы. Инструмент водного следа (WF) служит важным показателем для оценки влияния на качество водных ресурсов. Адаптация для промышленного водопользования в исследовании Jia и др. (2020) позволяет дать оценку как объемам обращаемых водных потоков, так и образующемуся загрязнению [12]. Помимо этого, данный подход позволяет учитывать вклад каждого из загрязнителей при выборе оптимальных водных сетей, что особенно важно в схеме с несколькими загрязнителями. Позже, опубликованное исследование Radelyuk и др. (2025) позволило совместить обе концепции по оптимизации и оценке водного следа, используя стратегию минимальных водных сетей (MWN) при помощи системы математического моделирования (GAMS) [13]. Подход MWN концептуально учитывает изменения процесса с целью выбора наиболее эффективных схем минимизации водопользования и позволяет не только повторно использовать воду, но и включает методику по сокращению потребления свежей воды. Разработка моделей математического программирования позволяет синтезировать комплекс водных потоков в рамках MILP-MINLP подхода [14].

Целью данной работы выступает разработка гибридной модели оптимизации, в которой объединены подходы WI и QQWF при помощи программного кода в среде GAMS с учетом многокомпонентных систем. В качестве объекта для анализа эффективности предлагаемой модели выступил казахстанский нефтеперерабатывающий завод. Проведенное исследование, в контексте оптимизации управления водными ресурсами, имеет решающее значение по содействию эффективного использования промышленных вод и обеспечения водной безопасности [15].

Материалы и методы

Все последующие формулы и обозначения, используемые для описания математических выражений, были реализованы при помощи средств математического программирования в среде GAMS Studio (релиз 45.7.0).

Исходными данными для составления математической модели послужили теоретические и практические результаты исследований Radelyuk и др. (2025), Jia и др. (2020), а также положения, изложенные в руководстве Hashim и др. [16]

Методология данного исследования включала в себя составление математического программного кода и реализована в две стадии:

построение гибридной модели водной интеграции и оценки качественно-количественного водного следа.

В первую очередь, профиль водных сетей промышленных предприятий задавался за счет составления материального баланса установок потребителей [17]. В уравнении 1 представлен расчет количества потребляемой установкой воды, выраженного в м3/ч:

$$D_j = Fw_j + \sum_i F_{i,j} + \sum_r Fro_{r,j} \quad (1)$$

где Fw_j – объемный расход потребляемой свежей воды установкой, м^3/ч;
$F_{i,j}$– объемный расход потребляемой циркулирующей воды, м^3/ч;
$Fro_{r,j}$– объемный расход потребляемой регенерированной воды, м^3/ч.

В свою очередь уравнение 2 для определения количества уходящей с установки воды в м^3/ч примет вид:

$$S_i = W_i + \sum_j F_{j,i} + \sum_r Fr_{i,r} \quad (2)$$

где W_i – объемный расход сбрасываемых сточных вод с установки, м^3/ч;
$F_{j,i}$ – объемный расход выходящей циркулирующей воды, м^3/ч;
$Fr_{i,r}$ – объемный расход воды, уходящей на регенерацию, м^3/ч.

Аналогично производилось составление материального баланса для установки регенерации сточных вод (в м^3/ч) и может быть определено через равенство 3:

$$\sum_i Fr_{i,r} = \sum_j Fro_{r,j} \quad (3)$$

Следующим шагом послужил учет количества обращаемых загрязнителей k и установление ограничений по их содержанию в потребляемой воде при помощи неравенства 4:

$$\sum_i F_{i,j} \cdot Cs_{i,k} + Fw_j \cdot Cw_k + \sum_r Fro_{r,j} \cdot Cro_{r,k} \leq D_j \cdot Cd_{j,k} \quad (4)$$

где $Cs_{i,k}$ – концентрация загрязнителей в потоке циркулирующей воды, г/м^3;
Cw_k – концентрация загрязнителей в потоке свежей воды, г/м^3;
$Cro_{r,k}$ – концентрация загрязнителей в потоке регенерированной воды, г/м^3;

$Cd_{j,k}$ – предельно допустимые концентрации загрязнителей в потребляемой воде установкой, г/м³.

Для установления допустимых связей между источниками и потребителями использована бинарная матрица $Bin_{i,j}$, принимающая значение 1 при наличии допускаемого потока и 0 при его отсутствии. Это ограничение можно отобразить через выражения 5 и 6:

$$B_{i,j} \leq Bin_{i,j} \quad (5)$$

$$F_{i,j} \leq B_{i,j} \cdot F_{max} \quad (6)$$

где $B_{i,j}$ – бинарная переменная, принимающая значение 0 или 1;
F_{max} – максимальная нагрузка сети по воде, м³/ч.

Переменную функции минимизации использования свежей воды выразили при помощи параметра F_{min}, который определяется из уравнения 7:

$$F_{min} = \sum_j Fw_j \quad (7)$$

Концепция водного следа (WF) подразумевает установление качественных характеристик (качественный водный след), таких как содержание загрязнителей *k* (мг/л или г/м³) в потоке, так и количественных показателей (количественный водный след), которые выражают объемные расходы потоков (м³/ч), образующихся или обращающихся в схеме. В качестве единицы измерения стоимостей использован USD/ч.

В основе расчета целевой функции – качественно-количественного водного следа (QQWF) выступили уравнения 8-10 в исследовании Jia и др., (2020). Уравнение 8 выражает качественный водный след, характеризующий затраты (в USD/ч) на очистку образующихся сточных вод до требуемого уровня:

$$WFql = \sum_i \left(Fdc_i \cdot Cs_{i,k} \cdot TC_k\right) - \sum_i (Fw_i \cdot Cw_k \cdot TC_k) \quad (8)$$

где $Cs_{i,k}$ – концентрация загрязнителей в потоке сточных вод, г/м³;
Cw_k – концентрация загрязнителей в потоке свежей воды, г/м³;
TC_k – затраты на удаление загрязнителей, USD/г.

В то же время, количественный водный след отражает затраты (USD/ч) на безвозвратное использование свежей воды и сброс сточных вод, что описывается уравнением 9:

$$WFqt = ECfs \cdot \sum_j Fw_j + ECre \cdot \left(\sum_i F_{i,j} - \sum_j F_{j,i}\right) - ECfs \cdot \sum_i W_i + WFdc \cdot \sum_i W_i \ , \quad (9)$$

где $ECfs$ – стоимость обращения свежей воды, USD/м³;
$ECre$ – стоимость обращения циркулирующей воды, USD/м³;
$WFdc$ – стоимость обращения сточных вод, USD/м³.

Таким образом, объединив уравнения качественного и количественного водного следа, итоговое значение водного следа (в USD/ч) в уравнении 10 приняло следующий вид:

$$QQWF = WFqt + WFql \quad (10)$$

Следует отметить, что в настоящем исследовании приводится расчет QQWF, который определяется итоговой суммой количественных и качественных показателей в целом, а не отдельных установок. С целью разрешения этой проблемы было предложено использовать дополнительные уравнения 11–14, которые позволили продемонстрировать вклад каждой установки как по обоим показателям, выраженным в USD/ч по потокам:

– свежей воды:

$$CFw_j = Fw_j \cdot ECfs + \sum_k Fw_j \cdot Cw_k \cdot TC_k \quad (11)$$

– циркулирующей воды между установками-потребителями:

$$CF_j = \sum_i F_{i,j} \cdot ECre + \sum_{i,k} F_{i,j} \cdot Cs_{i,k} \cdot TC_k \quad (12)$$

$$CF_i = \sum_j F_{i,j} \cdot ECre + \sum_{j,k} F_{i,j} \cdot Cs_{i,k} \cdot TC_k \quad (13)$$

– сбрасываемых сточных вод:

$$CW_i = W_i \cdot ECfs \quad (14)$$

Результаты и обсуждение

Предприятия нефтеперерабатывающей отрасли являются одними из крупнейших потребителей водных ресурсов и источниками образования значительных объёмов сточных вод, содержащих широкий спектр органических и неорганических соединений и их производных [18]. Согласно отчету Washington State Department of Ecology (2002) в первую очередь это связано с работой установок ЭЛОУ, систем охлаждения воды и отделения кислых стоков. В технологических процессах нефтепереработки компоненты-загрязнители, чаще всего, представлены в виде кислот, щелочей, твердых частиц (SS), соединений аммиака (NH_4+) и серы (S^2-), а также смесью органических соединений (TPH) широкого фракционного состава. Основными источниками таких загрязнений выступают процессы электрообессоливания, ректификации, промывки продуктов, высвобождающие значительное количество минерализованных, кислых стоков, содержащих нефтепродукты [19].

Главным литературным источником для написания данной работы послужило исследование Radelyuk и др. (2025), посвященное оптимизации и оценке водопользования на нефтеперерабатывающем предприятии в Казахстане. Ключевыми загрязнителями в данном исследовании выступили TPH, S^2- и NH_4+, что было принято аналогично в настоящей работе. Опираясь на данные по балансу водных потоков, была выстроена материально-поточная схема (рисунок 1) водной сети, которая послужила базовым сценарием для реализации и сравнительного анализа модели оптимизации. В таблице 1 представлены данные материальному балансу установок, а также по содержанию загрязнителей в потоках на выходе с них. Для оценки водного следа была использована информация по стоимости использования водных потоков (свежей воды, сбрасываемой воды) и удаления загрязнителей, которая показана в таблице 2 [13].

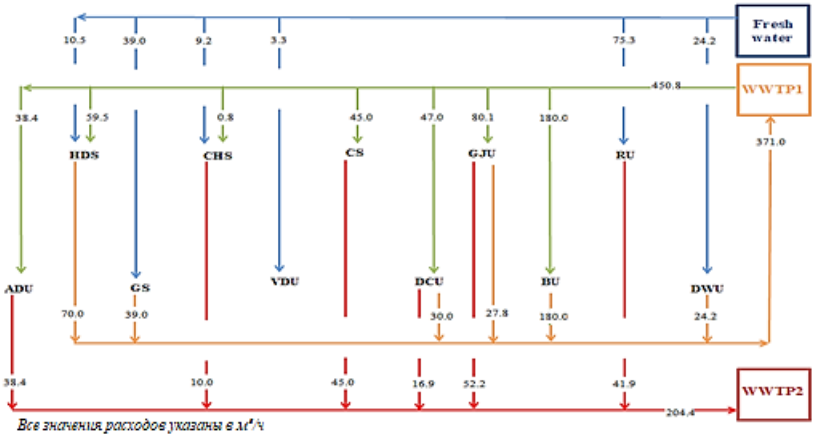


Рисунок 1 – Схема водопользования нефтеперерабатывающего завода в базовом сценарии

Таблица 1 – Характеристика потоков нефтеперерабатывающего завода

Установки и сокращения на схеме	Приход, $м^3/ч$	Расход, $м^3/ч$	Загрязнители ($г/м^3$)		
			TPH	NH_4^+	S^{2-}
Атмосферная перегонка (ADU)	38,4	38,4	1000	4500	5000
Гидроочистка (HDS)	70,0	70,0	300	4278	4870
Компрессия газов (GC)	39,0	39,0	800	4500	5000
Утилизация тепла дымовых газов 1 (CHS)	10,0	10,0	200	30	20
Вакуумная перегонка (VDU)	3,3	-	-	-	-
Утилизация тепла дымовых газов 2 (CS)	45,0	45,0	188	30	20
Замедленное коксование (DCU)	47,0	46,9	200	30	20
Сжижение газов (GJU)	80,1	80,0	65	30	20
Производство битумов (BU)	180,0	180,0	3000	30	20
Рециркуляция воды (RU)	75,3	41,9	25	30	20
Подготовка питьевой воды (DWU)	24,2	24,2	5	30	20
Итого	612,3	575,4			

Таблица 2 – Данные по стоимости обращения свежей воды, сброса сточных вод и удаления загрязнителей

Наименование обращаемого потока	Стоимость, USD/м^3	Наименование загрязнителей	Стоимость, USD/г
Свежая вода	0,05	Общее содержание углеводородов (TPH)	3,90
Циркулирующая вода	0,27	Соединения аммиака (NH_4^+)	0,50
Сточная вода	0,27	Сульфиды (S^{2-})	0,015

Посредством реализации гибридной математической модели в среде GAMS была произведена оптимизация водных потоков и на основании полученных данных выстроена новая материально-поточная схема (рисунок 2). Сравнение результатов сценариев до и после оптимизации позволило отметить существенное снижение образования сточных вод с 204,4 до 65,9 м^3/ч, а также сокращение потребления свежей воды со 161,5 до 102,8 м^3/ч. При этом стоит выделить, что нагрузка на установку водоочистки WWTP1 уменьшилась с 371,0 до 319,79 м^3/ч за счет формирования новых контуров циркуляции между потребителями. Основными источниками образования сточных вод, согласно модели, выступили установки RU и DWU, что объясняется низким предельным содержанием загрязнителей в выходных потоках с этих установок. Кроме того, на установки RU, DWU и VDU приходился набольший расход свежей воды. Потребление воды ниже 102,8 м^3/ч не может быть достигнуто, поскольку это бы потребовало использования дополнительных мощностей по регенерации стоков. По этой же причине невозможно снижение объемов сбрасываемых сточных вод ниже 65,9 м^3/ч.

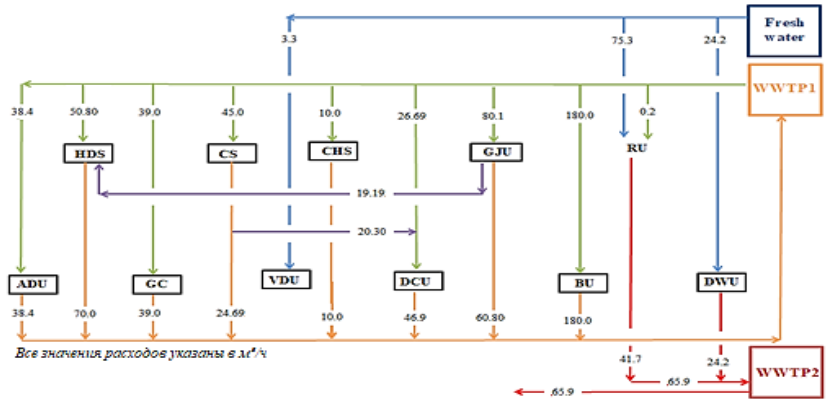


Рисунок 2 – Схема водопользования нефтеперерабатывающего завода после оптимизации

Наряду с этим была произведена оценка QQFW, которая показала, что наибольшие экономические затраты, в данном случае, были связаны с количественными показателями. Причиной этому выступили значительные расходы на транспортирование водных потоков, составляющих по некоторым расчетам 19,6 USD/ч. Вклад качественных показателей, характеризующих содержание загрязнителей в сточных водах, сбрасываемых с установки водосброса WWTP2, оценивается в 5,6 USD/ч. Совокупный водный след оптимизированной системы составляет 25,2 USD/ч. Данный эффект наблюдается при использовании свежей воды с нулевым содержанием загрязнителей в сочетании с концепцией MWN. Помимо этого, на основании уравнений 11-15, были получены данные, позволившие выразить затраты на использование воды в поточной схеме водной сети модели оптимизации (рисунок 3).

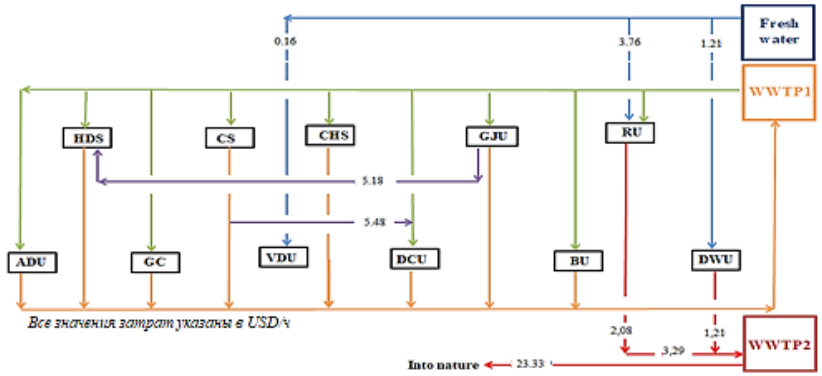


Рисунок 3 – Схема распределения затрат для оптимизированной схемы нефтеперерабатывающего завода в Казахстане

Сравнительный анализ исходных данных базового сценария и результатов математического моделирования сведен в таблицу 3.

Таблица 3 – Сравнительный анализ показателей сценариев до и после оптимизации

Индикатор	Базовый сценарий	После оптимизации	Эффект от реализации
Расход свежей воды, $м^3$/ч	161,5	102,8	-36,35 %
Количество сточных вод, $м^3$/ч	204,4	65,9	-67,76 %
Качественный водный след, USD/ч	312,9	5,6	-98,21 %
Количественный водный след, USD/ч	53,0	19,6	-63,02 %
Общий водный след, USD/ч	365,9	25,2	-93,11 %

Выводы

В ходе проведенного исследования была продемонстрирована эффективность гибридной оптимизационной модели, которая объединяет подходы водного интегрирования и количественно-качественную оценку водного следа в среде GAMS. Применение модели в отношении нефтеперерабатывающего завода показало ее широкую применимость и высокую эффективность. В результате проведенных мероприятий наблюдается существенное сокращение потребления пресной воды на 36,35 %. Также отмечено значительное уменьшение объемов образующихся

сточных вод на 67,76 %. Общий водный след был снижен на 93,11 % по сравнению с базовым сценарием.

Оптимизация водного следа позволила установить наиболее эффективные схемы водопользования в контексте материально-поточных и финансовых показателей промышленных предприятий. С точки зрения воздействия на окружающую среду, качественно-количественная оценка позволила определить не только объемы сбрасываемых сточных вод, но и количество загрязнителей, содержащихся в них на выходе. В этой связи, представленная модель устраняет пробел традиционных методов оптимизации, которые фокусировались только на количественных показателях, игнорируя качественный состав сточных вод и его стоимость. Стоит отметить, что из открытых источников были приняты средние значения стоимостей обращаемых потоков и удаления загрязнителей. Кроме того, расчет производился в условиях полной годовой производственной мощности с целью использования имеющихся данных по среднегодовым значениям концентраций загрязняющих веществ.

Исходя из вышеописанного, предложенный гибридный метод выступает как эффективное средство для перехода промышленных предприятий к модели устойчивого и рационального водопользования, который позволяет добиться значительной экономии водных ресурсов и сокращения негативного воздействия на окружающую среду.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Radelyuk, I., Tussupova, K., Zhapargazinova, K., Yelubay, M., & Persson, K. M.** Pitfalls of wastewater treatment in oil refinery enterprises in Kazakhstan // A system approach. Sustainability. – 11(6). – 2019. – 1618 p. – https://doi.org/10.3390/su11061618

2 **Weerasooriya, R., Liyanage, L., Rathnappriya, R., Bandara, W., Perera, T., & Gunarathna, M.** Industrial water conservation by water footprint and sustainable development goals : A review // Environment, Development and Sustainability. – 23. – 2021. – P. 12661–12709. – https://doi.org/10.1007/s10668-020-01184-0

3 **Lautze, J., Stander, E., Drechsel, P., da Silva, A. K., & Keraita, B.** Global experiences in water reuse // International Water Management Institute (IWMI). – 2014. [Electronic resource] – https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/9a91e6db-dda5-41f5-83b9-877fd4b7522b/content

4 **Masui, T., Hanaoka, T., Hikita, S., & Kainuma, M.** Assessment of CO_2 reductions and economic impacts considering energy-saving investments //

International Association for Energy Economics. – 2014. – P. 175–190. [Electronic resource]. – http://www.jstor.org/stable/23297062

5 **Fujimori, S., Hanasaki, N., Masui, T.** Projections of industrial water withdrawal under shared socioeconomic pathways and climate mitigation scenarios // Sustainability Science. – 12. – 2017. – P. 275–292. – https://doi.org/10.1007/s11625-016-0392-2

6 **Kato, S., Kansha, Y.** Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques // Environ Sci Pollut Res. – 31. – 2024. – P. 51064–51097. – https://doi.org/10.1007/s11356-024-34584-0

7 **Zhang, L., & Chen, X.** Global perspectives on industrial wastewater management : A bibliometric analysis of research output // Hazardous Materials Advances. – 4. – 2024. – 100567 p. – https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100567

8 United Nations. The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace // UNESCO. – 2024. – https://doi.org/10.54679/WZDQ6209

9 **Liu, C., & Zhang, Y.** A review of industrial water resources efficiency // Frontiers in Science and Engineering. – 4(9). – 2024. – P. 103–108. – https://doi.org/10.54691/yhsanz18

10 **Agana, B. A., Reeve, D., & Orbell, J. D.** An approach to industrial water conservation – A case study involving two large manufacturing companies based in Australia // Journal of Environmental Management. – 114. – 2013. – P. 445–460. – https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.047

11 **Dakwala, M., Mohanty, B., & Bhargava, R.** A process integration approach to industrial water conservation: A case study for an Indian starch industry // Journal of Cleaner Production. – 17(18). – 2009. – P. 1654–1662. – https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.08.007

12 **Jia, X., Varbanov, P. S., Wan Alwi, S. R., Yang, D., & Klemeš, J. J.** Cost-based quantitative-qualitative water footprint considering multiple contaminants // Resources, Conservation and Recycling. – 168. – 2021. – 105339 p. – https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105339

13 **Radelyuk, I., Jia, X., Tan, R. R., Yelubay, M., & Baimatova, N.** Assessing the impact of water integration on water resource management in Central Asia: A case study of Kazakhstani industry // ACS ES&T Water. – 2025. – https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00718

14 **Lee, S. J., Wan Alwi, S. R., Lim, J. S., & Manan, Z. A.** Minimum water network design for fixed schedule and cyclic operation batch processes with minimum storage capacity and inter-connections // Journal of Cleaner Production. – 77. – 2014. – P. 65–78. –https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.061

15 **Yue, Z., Alun, G., & Bolin, P.** Relationship between industrial water consumption and economic growth in china based on environmental Kuznets Curve // Water. – 9(8). – 2017. – P. 556. – https://doi.org/10.3390/w9080556

16 **Hashim, H.** Formulation of mathematical modelling for the design of maximum water recovery. Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru, Malaysia.

17 **Handani, Z. B., Sharifah, R. Wan Alwi, Hashim H., Manan Z. A.** Holistic approach for design of minimum water networks using the mixed integer linear programming (MILP) technique // Chemical Engineering Transactions. – 63. – 2010. – P. 73–78. – https://doi.org/10.3303/CET1863013

18 **Al-Khalid, T., & El-Naas, M. H.** Organic contaminants in refinery wastewater: Characterization and novel approaches for biotreatment / In M. H. El-Naas (Ed.) // Advanced biological processes for wastewater treatment. IntechOpen. – 2018. – https://doi.org/10.5772/intechopen.72206

19 United States Environmental Protection Agency. Petroleum refining effluent guidelines and standards (EPA-821-R-19-005). – 2019. [Electronic resource] – https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-10/documents/petro-refining-elg-study-2019.pdf

Поступило в редакцию 10.07.26.
Поступило с исправлениями 30.07.26.
Принято в печать 03.09.26.

В. В. Воронков[1], **И. М. Раделюк*[2]
[1,2]Торайғыров университеті,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
10.07.26 ж. баспаға түсті.
30.07.26 ж. түзетулерімен түсті.
03.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ӨНЕРКӘСІПТІК КӘСІПОРЫНДАРДА СУ ІЗІН ОҢТАЙЛАНДЫРУҒА АРНАЛҒАН ГИБРИДТІК МОДЕЛІН ӘЗІРЛЕУ

Осы зерттеуде өнеркәсіптік кәсіпорындарда қолдануға арналған су интеграциясы және сандық-сапалық су ізі тәсілдерін біріктіретін гибридті математикалық оңтайландыру моделін әзірлеу нәтижелері ұсынылған. Модель GAMS алгебралық бағдарламалау ортасында MILP әдістерін қолдану арқылы жүзеге асырылып, Қазақстандағы мұнай өңдеу зауытына қолданылды . Есептеу нәтижелері су

ресурстарын пайдаланудың тиімділігінің айтарлықтай артқанын көрсетті. Атап айтқанда, тұщы су тұтыну көлемі 161,5-тен 102,8 м³/сағ-қа дейін (36,35 %-ға) азайды, ал ағынды сулар көлемі 204,4-тен 65,9 м³/сағ-қа дейін (67,76 %-ға) қысқарды. Сонымен қатар, жалпы су ізі 365,9-дан 25,2 USD/сағ-қа дейін төмендеп, 93,11 %-ға азайды. Бұл нәтиже су ағындарын оңтайлы қайта бөлу және жабық су айналымдарын қалыптастыру арқылы ластаушы заттардың концентрациясын төмендету есебінен сандық (–63,02 %) және сапалық (–98,21 %) көрсеткіштердің қысқаруымен қамтамасыз етілді. Алынған нәтижелер су интеграциясы мен су ізі тәсілдерін біріктіру су тұтынуды азайтумен қатар, ластанудың экономикалық әсерін ескеруге мүмкіндік беретінін көрсетеді. Ұсынылған гибридті әдіс өнеркәсіптік жүйелерде ресурстарды тиімді пайдалану мен қоршаған ортаға түсетін жүктемені азайтудың тиімді құралы бола алады.

Кілтті сөздер: су ізі, су интеграциясы, қайта пайдалану, су тұтынуды оңтайландыру, гибридті модельдер.

V. V. Voronkov[1], **I. M. Radelyuk*[2]
[1,2]Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 10.07.26.
Received in revised form 30.07.26.
Accepted for publication 03.09.26.

DEVELOPMENT OF A HYBRID MODEL FOR WATER FOOTPRINT OPTIMIZATION IN INDUSTRIAL FACILITIES

This study presents the development of a hybrid mathematical optimization model that integrates the principles of water integration and quantitative–qualitative water footprint assessment for industrial applications. The model was implemented in the GAMS algebraic modeling environment using a MILP approach and applied to an oil refinery in Kazakhstan. The simulation results demonstrate a significant improvement in water use efficiency. In particular, freshwater consumption was reduced from 161.5 to 102.8 m³/h (36.35 %), while wastewater generation decreased from 204.4 to 65.9 m³/h (67.76 %). At the same time, the total water footprint decreased from 365.9 to 25.2 USD/h, corresponding to a 93.11 %

reduction. This improvement was achieved through reductions in both the quantitative (–63.02 %) and qualitative (–98.21 %) components, driven by optimized flow distribution and reduced contaminant concentrations via the formation of closed-loop water reuse systems. The obtained results confirm that integrating water integration and water footprint approaches enables not only the minimization of water consumption but also the incorporation of economic impacts of pollution. The proposed hybrid approach can serve as an effective tool for improving resource efficiency and reducing environmental impacts in industrial systems.

Keywords: water footprint, water reuse, water integration, water optimization, hybrid models.

МРНТИ 44.29.35
https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/214-232

Ф. А. Габыл-Манапова[1], А. Б. Бекбаев[2], Р. Ш. Абитаева[3], А. Ф. Ишангалиева[4]
[1,2,3,]Казахский Национальный Исследовательский Технический университет имени К.Сатпаева,
Республика Казахстан, г. Алматы;
[4]Средняя общеобразовательная школа имени М-С. Бабажанова,
Республика Казахстан, Западно-Казахстанская обл.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1281-1302
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3520-1710
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0431-9559
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3719-7908
*e-mail: fariza2909@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ЕГО ВЛИЯНИЯ

В этой статье разбирается, как на линиях электропередачи образуется лед и почему это мешает нормальной работе энергосистемы. Автор описывает саму физику процесса: как именно нарастает наледь и как она влияет на состояние проводов. Главными причинами здесь выступают погода, влажность и ветер – именно от них зависит, насколько быстро обледенеют линии и ухудшатся их характеристики.

Также в тексте анализируются разные способы следить за состоянием проводов. Рассматриваются как обычные визуальные осмотры и камеры с распознаванием образов, так и специальные датчики. Отдельное внимание уделено оптоволоконным технологиям. Они работают точно, не боятся электромагнитных помех и позволяют контролировать ситуацию на очень больших расстояниях.

В итоге автор делает вывод, что существующие методы мониторинга нужно улучшать, а сами конструкции ЛЭП делать более прочными, чтобы они лучше справлялись с гололедом и не выходили из строя. Перспективы дальнейших исследований направлены на оптимизацию существующих методов диагностики и повышение безопасности эксплуатации ВЛ в условиях интенсивного обледенения. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и эксплуатации воздушных линий электропередачи в условиях неблагоприятных климатических воздействий. Практическая значимость работы заключается в возможности повышения надежности энергоснабжения и снижения эксплуатационных рисков.

Ключевые слова: Воздушные линии электропередачи, гололед, надежность, климатические факторы, мониторинг, диагностика, ледовые нагрузки, пляска проводов.

Введение

Обледенение воздушных линий электропередачи (ВЛ) представляет собой одну из главных проблем для энергетических систем, особенно в регионах с резко континентальным климатом, таких как Казахстан. Это явление может привести к серьезным авариям, нарушению работы энергетических систем и экономическим потерям. Образование льда на проводах изменяет аэродинамические характеристики, увеличивает механическую нагрузку на конструкции, что в свою очередь может вызывать сбои в электроснабжении. Поэтому актуальность исследования процессов гололёдообразования на ВЛ, разработки методов мониторинга и диагностики данного явления невозможно переоценить.

В данной статье рассматриваются физические основы процессов обледенения воздушных линий, влияние климатических факторов на надежность ВЛ, а также методы диагностики и мониторинга гололёдообразования. В данной работе предлагается способ расчета того, как сильно обмерзают провода, на основе существующих теорий и тестов. При расчетах учитываются температура, влажность и скорость ветра. Также рассматриваются современные способы слежения за состоянием линий – как с помощью датчиков на самих проводах, так и дистанционно. Описано, как лед влияет на прочность и электропроводность линий, и даны советы, как сделать работу электросетей надежнее в таких условиях.

Материалы и методы

Почему на линиях электропередачи образуется лед?

Проблема обледенения известна еще с 1920-х годов. Лед портит аэродинамику проводов и часто приводит к поломкам всей линии. Именно поэтому изучению нарастания льда уделяют так много внимания [1]. Когда на проводах происходит обледенение, изменение формы профиля приводит к снижению проводимости и увеличению сопротивления, что может привести к авариям с летальным исходом [2]. Исторические исследования

обледенения неоднократно описывались в литературе [1; 2; 3]. На ранних этапах исследования обледенения проводились в основном эксперименты, направленные на понимание физики обледенения и разработку методов борьбы с обледенением [4]. В 1970-х годах началось развитие численного моделирования обледенения воздушных линии. Целью моделирования было снижение затрат и риска несчастных случаев в процессе сертификации устройств для предотвращения обледенения. С тех пор для создания более точных инструментов моделирования обледенения использовались экспериментальные и численные исследования.

Экспериментальные и теоретические подходы

Для регионов с морозами лед на проводах и линиях связи – одна из главных проблем при проектировании. Если опоры ломаются под весом льда, это приносит огромные убытки и мешает работе энергетиков. С другой стороны, делать опоры слишком массивными «с запасом» очень дорого, что сильно увеличивает стоимость строительства. Поэтому важно иметь оценки интенсивности обледенения и максимальных ледовых нагрузок в различных условиях, чтобы оптимизировать конструкцию сооружений. Влияние температуры воздуха на гололедную нагрузку оказывается незначительным в течение первых 24 часов обледенения в типичных условиях сухого роста, но оно важно при длительном обледенении. Конечная гололедная нагрузка может как увеличиваться, так и уменьшаться с понижением температуры воздуха в зависимости от других атмосферных условий и продолжительности обледенения. Эти результаты во многом объясняют трудности, возникающие при оценке образования гололедных нагрузок простыми методами, использующими регулярно измеряемые метеорологические параметры [5].

Эти оценки могут быть получены путем сбора длительных временных рядов наблюдений за нагрузками на лед, и таким образом для некоторых мест были получены довольно обширные статистические данные (Руднева, 1973). Однако в большинстве случаев это требует слишком много времени и трудоемкости для практических целей, например, при проектировании линии электропередачи. Поэтому необходимо использовать косвенные методы, которые связывают интенсивность образования льда с метеорологическими условиями. Такие методы были разработаны эмпирическим путем путем одновременных измерений накопления льда и метеорологических параметров (McKay and Thompson, 1969; Барановский и Либерсбах, 1977; Ахти и Макконен, 1982), с приемлемыми результатами. Однако обобщение этих результатов затруднено из-за взаимной корреляции факторов, влияющих на рост льда, и их вариабельности в зависимости от местности. Кроме того, большое количество переменных, связанных

с обледенением, некоторые из которых трудно измерить, затрудняет интерпретацию эмпирических наблюдений. Теоретическое моделирование необходимо для выявления основных физических процессов, которые контролируют скорость обледенения проводов.

Модель имитирует оседание капель переохлажденной воды на проводе, например, на потолочном проводнике. Предполагается, что капли воды движутся горизонтально в воздушном потоке в условиях тумана или облачности. Образование льда при ледяном дожде при низких скоростях ветра и образование снега не рассматриваются, поскольку моделирование образования мокрого снега включает в себя содержание снега в воздухе и аэродинамику снежинок, которые плохо известны, а ледяной дождь при низких скоростях ветра может привести к образованию сосулек. Ледяной дождь при низкой скорости ветра и налипание снега могут вызвать обледенение проводов, но в большинстве регионов осадки редко сопровождаются обледенением (Ахти и Макконен, 1982). Кристаллы льда, смешанные с каплями переохлажденной воды, могут незначительно способствовать росту льда (Эшворт и Найт, 1978), но это не учитывается в модели, поскольку количество кристаллов льда в приземных условиях обычно невелико. Пористость льда не учитывается, поскольку жидкая вода, по-видимому, не впитывается в лед при небольших концентрациях жидкой воды и скоростях вращения, характерных для обледенения проволоки в естественных условиях (Lesins et al., 1980). В модели предполагается направление ветра, перпендикулярное проводам [6; 7].

На цилиндрическом объекте интенсивность обледенения I, т.е. скорость увеличения массы льда, деленная на часть площади поверхности ледяного покрова, обращенную к ветру, может быть рассчитана из

$$I = \frac{2}{\pi} E n \vartheta w, \tag{1}$$

где E – эффективность сбора, т.е. отношение массового расхода падающих капель воды к массовому расходу, который ощущался бы на поверхности, если бы капли не отклонялись воздушным потоком, n – доля замерзания, т. е. отношение интенсивности обледенения к массовому расходу падающих капель воды; ϑ – скорость ветра, а w – содержание жидкой воды в воздухе. Величины I, E и n в уравнении (1) – это общие значения для проволоки (или отложения льда). В модели предполагается, что слой льда сохраняет круглую форму в процессе обледенения из-за медленного вращения, которое он испытывает под действием силы тяжести,

как только слой становится асимметричным, и используется уравнение (1). На проводах линий электропередачи наросшие ледяные отложения иногда имеют эллиптическую форму, особенно вблизи опорных конструкций, где предотвращается перекручивание проводов. Однако среднее отклонение от круглой формы невелико, как показывают наблюдения на горе Вашингтон, штат Нью-Гэмпшир (Howe, 1982), и данные из СССР (более 2500 наблюдений), (Драневич, 1971): Отношение малой оси к большой на реальных проводниках линий электропередачи составляет в среднем 0,88 для глазури и 0,82 для инея [8].

Сначала определяется эффективность сбора, основанная на среднем объемном диаметре распределения капель. Расчет основан на численном решении Ленгмюра и Блоджетт для безразмерного уравнения движения капли в воздушном потоке:

$$K\frac{dv_d'}{d_\tau} = \frac{c_d Re_r}{24}(v_a' - v_d') \tag{2}$$

где τ – время, c_d – оэффициент лобового сопротивления капель.

Параметр инерции можно найти с формулой:

$$K = \frac{\rho_w \vartheta d^2}{9\mu D} \tag{3}$$

$$Re_r = \frac{\rho_a d|v_a - v_d|}{\mu} \tag{4}$$

число Рейнольдса капли основано на относительной скорости капли, $v_a' = \frac{v_a}{\vartheta}$ – безразмерная скорость воздуха, а $v_d' = \frac{v_d}{\vartheta}$ – безразмерная скорость капли. Здесь d – диаметр капли, ρ_w – плотность воды, μ – абсолютная вязкость воздуха, D – диаметр цилиндра, а ρ_a – плотность воздуха. Вектор скорости воздуха v_a' получен из уравнения для потенциального обтекания цилиндра, а коэффициент лобового сопротивления c_d как функция Re – из экспериментальных данных Ленгмюра и Блоджетт. Решение уравнения формула (2) затем может быть использована для расчета траекторий капель, на основе которых определяется общая эффективность сбора E_m. Результаты этого расчета приведены Ленгмюром и Блоджетт.

Увеличение диаметра D в процессе обледенения оказывает следующие зависящие от времени эффекты на увеличение ледовой нагрузки:

• Интенсивность обледенения I уменьшается при сухом росте из-за снижения эффективности сбора E.

• Интенсивность обледенения I уменьшается по мере роста влажности из-за уменьшения коэффициента теплообмена h и доли замерзания.

• Площадь сбора и площадь теплообмена увеличиваются.

• Плотность нарастающего льда уменьшается при сухом росте из-за снижения скорости падения капель и температуры поверхности льда. Это увеличивает скорость роста диаметра в зависимости от интенсивности обледенения, влияя на вышеупомянутые процессы, зависящие от времени [9; 10].

Влияние климатических факторов на надёжность и потери электроэнергии

Климатические факторы, влияющие на обледенение

Обеспечение бесперебойного электроснабжения – одна из главных целей для компаний, отвечающих за его поставку и эксплуатацию. Исследования показывают, что воздушные линии (ВЛ) – это самое слабое место в электросетях. В Казахстане их протяженность превышает 90 тысяч километров, а в России – около 460 тысяч. Авария на такой линии может оставить без света целые области. Поскольку линии напряжением 110–500 кВ крайне важны для энергосистемы Казахстана, любые поломки на них обходятся очень дорого.

Надежность линий зависит от многих причин: климата, конструкции, возраста линии и типа используемых проводов. Чтобы сети работали стабильнее, нужно изучать статистику прошлых аварий и понимать, из-за чего они случились. Если сравнивать реальные поломки с прогнозами, можно понять, насколько хорошо работают наши расчеты и принятые меры.

Потери энергии и риски аварий

На рисунке 1 показано, как распределяются причины аварий.

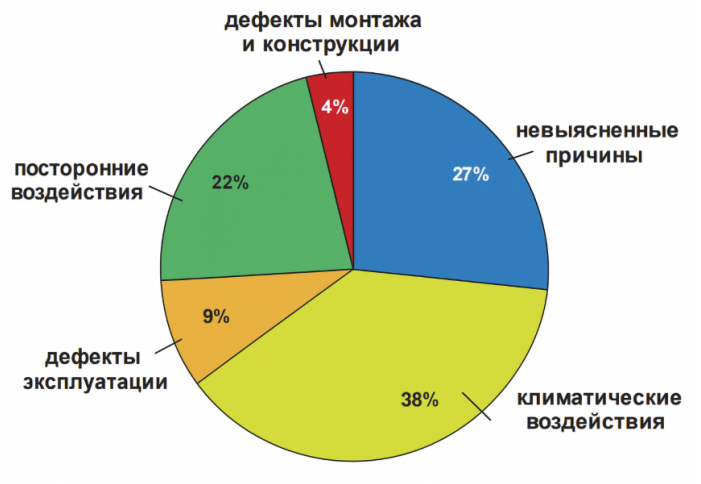


Рисунок 1 – Основные причины частых аварий на воздушных линиях.

Анализ показывает, что надежность линий зависит от погоды (грозы, лед, ветер), нарушений режима работы, плохого обслуживания или просто износа оборудования. Также мешают животные, птицы, посторонние предметы, вандализм и ошибки людей – как при строительстве, так и при эксплуатации.

Энергосистема – это сложная сеть, где поломка в одном месте может вызвать цепную реакцию. Природные катаклизмы вроде ураганов или сильных морозов чаще всего становятся причиной таких сбоев. Очень важно уметь предсказывать аварии, особенно в тех местах, которые важны для безопасности всей страны. Провода страдают больше всего, так как они находятся под открытым небом и принимают на себя все удары погоды.

Таблица 1 – Статистика поломок ВЛ в зависимости от типа неисправности и напряжения

Класс напряжения, кВ	Количество отключений ВЛ по причинам, %							
	Внешние эффекты	Климатические эффекты			Дефекты			Необъяснимые причины
		молния	ветер-замерзание	другие	использование	структуры	монтаж	
35	16,9	22,7	20,2	1,9	8,2	0,8	1,5	27,7
110	27,0	14,2	16,0	1,8	9,5	2,0	3,1	28,4
220	19,4	15,3	19,1	1,3	7,6	5,7	4,0	27,6
330	20,3	9,3	15,6	1,9	5,9	3,5	4,9	38,5
500	15,1	15,1	16,5	1,0	11,8	3,2	1,2	36,0
750	9,0	15,5	18,5	-	8,8	5,4	4,4	39,4

Данные показывают, что причина аварии почти не зависит от того, какое напряжение в линии. Чтобы повысить надежность, нужно глубже изучать, почему именно выходят из строя отдельные детали.

В Казахстане активно строят новые электростанции и тянут новые линии. Это важно для страны, но климат создает большие сложности. Сильный ветер, скачки температуры и гололед постоянно угрожают работе сетей.

Особенно опасны интенсивное обледенение и «пляска проводов». Из-за этого провода слабеют, хуже проводят ток, а энергия теряется впустую. В худшем случае случаются аварии. Проблема наиболее актуальна для севера, востока и центра Казахстана, где мороз и ветер создают идеальные условия для намерзания льда.

Гололед на проводах и опорах появляется, когда переохлажденные капли воды оседают на металле. В зависимости от погоды это может быть плотный лед, изморозь или иней.

Наличие ледяного слоя приводит к увеличению массы провода, росту натяжения и изгибающих нагрузок, изменению профиля провисания и повышению аэродинамической восприимчивости к колебаниям.

Методы диагностики и мониторинга гололёдообразования

Бесконтактные и контактные методы мониторинга

В настоящее время методы мониторинга образования льда на воздушных линиях в основном делятся на две категории: бесконтактные и основанные на контакте подходы. Бесконтактные методы измерения в основном включают

ручное наблюдение и распознавание изображений. Ручное наблюдение обычно включает визуальный осмотр и взвешивание собранных образцов льда для получения такой информации, как форма льда. Например первые исследователи использовали две камеры для получения снимков ледяного покрова и анализа формы и толщины наростов льда на ледяном покрове. А в других исследованиях применена регрессия опорных векторов для оптимизации параметров Canny (применяемого при обработке изображений), улучшения распознавания кромок на изображениях срастания льда и облегчения определения толщины льда на сложных фоновых изображениях. Однако эти методы не в состоянии обнаружить внутренние изменения, происходящие в процессе замораживания-оттаивания льда. Кроме того, в суровых условиях окружающей среды низкая эффективность наблюдений и такие проблемы, как засорение линзы льдом, препятствуют мониторингу образования льда на воздушных линиях в режиме реального времени [11].

Контактные методы обычно устанавливают датчики непосредственно на линях для мониторинга образования льда, и в первую очередь это электрические и волоконно-оптические датчики. Электрические датчики измеряют силу, угол наклона, емкость, вибрацию и ультразвук. Он может преобразовывать такие характеристики, как вес, изгиб, диэлектрическая проницаемость и собственная частота воздушных линий после обледенения, в электрические сигналы в режиме реального времени, отражая тем самым состояние ледяного покрытия. Однако сильные магнитные поля вокруг линии могут вызывать значительные электромагнитные помехи, снижающие точность измерений, выполняемых электрическими датчиками.

Современные технологии мониторинга

Технология оптоволоконного зондирования, обладающая высокой точностью и устойчивостью к электромагнитным помехам, показала большие перспективы для обнаружения скопления льда на линиях. В настоящее время используются два основных технических подхода: метод распределенного оптического волокна и метод волоконной брэгговской решетки (ВБР). Sun и соавт. предложили распределенный волоконно-оптический метод определения срастания льда (толщины льда), основанный на разнице температур между покрытыми льдом и не покрытыми льдом участками линии, используя оптическую рефлектометрию Бриллюэна во временной области (BOTDR) для измерения температуры. Сюй и др. встроил оптические волокна в TL для измерения внутренней температуры и определил разность фаз между измеренной температурной кривой и кривой температуры окружающей среды, предложил критерий образования льда и разработал формулу для оценки толщины льда [19]. Используя технологию

распределенного зондирования с помощью фазочувствительного оптического рефлектометра во временной области (Ф-OTDR), Дин и его коллеги измерили осевую деформацию линии для определения толщины льда. Несмотря на то, что методы распределенного оптоволоконного зондирования обладают потенциалом для обнаружения образования льда на воздушных линиях на больших расстояниях, они по-прежнему имеют ограничения, связанные с локальным точным развертыванием, что имеет решающее значение для оптимизации стратегий борьбы с обледенением (таких как время таяния и сила тока) [13; 14].

Пассивные методы основаны на отсутствии постоянного вмешательства в процесс измерений – данные получают с помощью осмотров, фотофиксации и анализа эксплуатационных параметров.

Традиционный метод контроля, включающий:

- обходы персонала,
- использование биноклей, тепловизоров,
- фиксацию толщины льда визуально.

Преимущества:

- простота реализации, отсутствие дорогостоящего оборудования,
- возможность оценки сопутствующих повреждений.

Недостатки:

- низкая оперативность,
- зависимость от погодных условий,
- человеческий фактор,
- невозможность контроля в реальном времени.

Анализ эксплуатационных параметров включает контроль: изменения провисания провода, увеличения механической нагрузки, регистрации «пляски проводов», изменения токов и напряжений, появления вибрационных резонансов.

При обледенении увеличивается масса проводов, что приводит к росту угла провисания и появлению низкочастотных колебаний.

Эти признаки используются как косвенный индикатор наличия наледи.

Датчиковые методы включает механические, вибрационные, деформационные, оптические и метеорологические датчики, устанавливаемые непосредственно на провод или опору.

Регистрация собственных колебаний провода (частоты 0.1–10 Гц).

При образовании льда масса провода увеличивается, а собственная частота снижается. Принцип:

$$f = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}},$$

где T – натяжение μ – линейная масса (увеличивается при обледенении).

Проблемы таких методов являются установки на многие пролёты, высокая стоимость на длинных ВЛ и чувствительность к ветровым нагрузкам [15].

Таблица 2 – Датчики для мониторинга гололёдообразования

Тип датчика	**Принцип работы**	**Измеряемые параметры**	**Измеряемые параметры**
Вибрационные	Фиксация частоты колебаний провода Измерение натяжения	Частота 0.1–10 Гц	Частота 0.1–10 Гц
Тензодатчики		Механическая нагрузка	Механическая нагрузка
FBG-датчики	Изменение длины волны отражения в волокне	Деформации, температура	Деформации, температура
Метеодатчики	Измерение параметров воздуха	T, влажность, ветер	T, влажность, ветер
Акустические	Резонанс и звук от покрытия	Толщина льда	Толщина льда

Датчики деформации (strain-gauges) – фиксируют изменение напряжённого состояния провода или троса.

Современные реализации используют:

- тензодатчики,
- волоконно-оптические датчики (FBG),
- пьезоэлектрические сенсоры.

Преимущества:

- высокая точность измерения массы льда,
- измерение динамики («freezing–thawing cycle»).

Недостатки:

- сложность монтажа,
- ограниченный ресурс.

Радарные и рефлектометрические методы используют отражение радиоволн от поверхности провода:

- изменение амплитуды, фазы и затухания отражённого сигнала,
- оценка толщины льда по изменению диэлектрических свойств.

Преимущества – работают даже при плохой видимости. Минус – высокая стоимость оборудования.

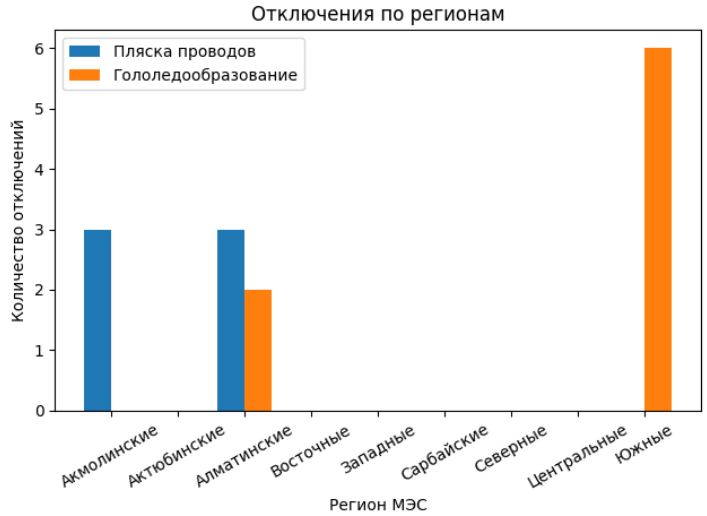


Рисунок 2 – Отключение ВЛЭП из-за пляски и гололедообразование проводов по регионам Казахстана

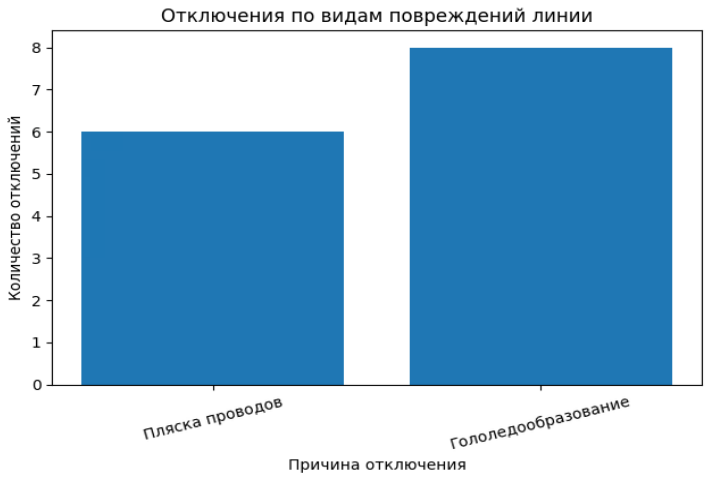


Рисунок 3 – Отключение по видам повреждений линии

Анализ отказов ВЛ АО «KEGOC» (раздел: повреждение воздушных линий) показывает, что существенную долю занимают метеорологические и аэродинамические факторы.

Пляска проводов и грозотроса

Всего зарегистрировано 6 отключений.

Они распределены неравномерно по регионам – зафиксированы преимущественно на линиях 220–500 кВ отдельных МЭС (наиболее характерно для степных ветровых районов).

Поджатие провода (или шлейфа) к телу опоры

Всего 12 отключений.

Причины: провисание, ветровое отклонение, обледенение, неправильная стрелка провеса.

Отмечены в нескольких МЭС, включая линии 110–500 кВ.

Гололёдообразование

Всего 8 отключений.

Наиболее выражено в северных и центральных районах сети, где наблюдаются продолжительные периоды отрицательных температур и влажного ветра.

Вывод по статистике

Метеорологические воздействия образуют взаимосвязанную группу причин

Таблица 3 – Причины образованные метеорологическими воздействиями

Фактор	Характер
Гололёд	увеличивает массу и аэродинамический профиль провода
Ветер	возбуждает колебания
Пляска	приводит к КЗ и схлёстыванию фаз
Поджатие к опоре	вторичный эффект колебаний

Именно поэтому эти причины нельзя рассматривать отдельно – они являются одной физической цепочкой процесса.

Гололёдообразование на ВЛ в климате Казахстана

Для Казахстана характерны:

- резко континентальный климат
- частые переходы через 0 °C
- туманы и морось при ветре
- открытая степная местность (большие разгоны ветра)

Такая комбинация – классическая для интенсивного обледенения ВЛ.

Механизм образования

Гололёд возникает при осаждении переохлаждённых капель воды на провод:

- капля касается холодного проводника
- мгновенно замерзает
- формируется асимметричная ледяная муфта
- диаметр провода увеличивается в 2–5 раз
- масса возрастает до 10–20 кг/м

Инженерные последствия

- увеличивается стрелка провеса
- возрастает нагрузка на опоры
- ухудшается электрическая изоляция
- меняется аэродинамика провода

Главное – провод перестаёт быть цилиндром.

Таблица 4 – Физическая зависимость

Параметр	Без льда	С льдом
Форма	круг	аэродинамический профиль
Подъёмная сила	≈0	появляется
Амплитуда	сантиметры	метры
Частота	высокая (вибрация)	низкая (пляска)
Опасность	износ	авария

Разбор аварий показывает следующую цепочку:

Сначала нарастает лед. Затем провод начинает раскачиваться (пляска).

В итоге из-за колебаний провод приближается к опоре или другим проводам, что ведет к поломке.

Результаты и обсуждение

Исследования подтвердили, что опаснее всего погода от 0 до −10 °C при высокой влажности и ветре. В Казахстане такая погода встречается часто, поэтому риск аварий велик. Лед меняет форму провода, из-за чего ветер начинает его сильно раскачивать – это и есть «пляска», которая часто рвет линии.

Статистика подтверждает: погода запускает целую серию проблем – от простого утяжеления провода до его обрыва или короткого замыкания. При этом неважно, высоковольтная это линия или обычная – лед влияет на них одинаково.

Сравнение способов слежения показало, что обычные осмотры часто не дают вовремя заметить проблему. Датчики на проводах работают лучше, но они дорогие и их сложно устанавливать. Самым перспективным вариантом сейчас выглядит использование оптоволокна. Оно позволяет точно следить за всей линией и не боится электрических помех.

В целом, чтобы линии реже ломались из-за льда, нужно действовать комплексно: учитывать местный климат, ставить современные системы мониторинга и улучшать саму конструкцию опор и проводов.

Выводы

Исследование показало, что лед сильно меняет работу линий электропередачи. Из-за лишнего веса провода сильнее натягиваются и начинают иначе реагировать на ветер. В условиях нашего климата это часто приводит к серьезным сбоям в подаче электричества.

Существующие методы контроля имеют свои плюсы и минусы. Новые технологии, такие как оптоволоконные датчики, дают возможность точнее следить за льдом и вовремя принимать меры.

Чтобы в будущем сети работали стабильнее, нужно не только обновлять системы мониторинга, но и делать конструкции более прочными. Дальнейшая работа должна быть направлена на то, чтобы лучше предсказывать обледенение и не допускать отключений света.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Mackay, D. S., Thompson, G.** Ice accretion on overhead transmission lines [Текст] // Journal of Applied Meteorology. – 1969. – Vol. 8. – P. 123–130.

2 **Makkonen, L.** Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures [Текст] // Cold Regions Science and Technology. – 1981. – Vol. 3. – P. 145–158.

3 **Lozowski, E. P., Stallabrass, J. R., Hearty, P. F.** The icing of an unheated, non-rotating cylinder. Part I: A simulation model [Текст] // Journal of Climate and Applied Meteorology. – 1983. – Vol. 22. – P. 2053–2062.

4 **Ahti, K., Makkonen, L.** Ice accretion on wires [Текст] // Journal of Applied Meteorology. – 1982. – Vol. 21. – P. 1382–1394.

5 **Ashworth, R. A., Knight, C. A.** Ice crystal growth in the atmosphere [Текст]. – New York : Academic Press, 1978. – 237 p.

6 **Lesins, G., Farzaneh, M., Lozowski, E.** Characteristics of ice accretion on overhead conductors [Текст] // Atmospheric Research. – 1980. – Vol. 14. – P. 215–230.

7 **Howe, K. E.** Ice accretion measurements on Mount Washington [Текст] // Journal of Applied Meteorology. – 1982. – Vol. 21. – P. 1005–1012.

8 **Драневич, А. Н.** Обледенение проводов линий электропередачи [Текст]. – М. : Энергия, 1971. – 120 с.

9 **Руднева, Т. В.** Гололедные нагрузки на провода линий электропередачи [Текст]. – М. : Энергоатомиздат, 1973. – 98 с.

10 **Барановский, Н. В., Либерсбах, А. Г.** Методы оценки обледенения проводов воздушных линий [Текст]. – М. : Энергия, 1977. – 110 с.

11 **Бендель, В., Патон, Б.** Обледенение инженерных конструкций [Текст]. – М. : Мир, 1981. – 256 с.

12 **Langmuir, I., Blodgett, K. B.** A mathematical investigation of water droplet trajectories [Текст]. – Washington : U.S. Army Air Forces, 1946. – 45 p.

13 **Sun, Y. et al.** Distributed optical fiber sensing for ice detection on transmission lines [Текст] // Sensors. – 2019. – Vol. 19. – P. 1–12.

14 **Xu, L. et al.** Ice thickness estimation on transmission lines based on temperature phase difference [Текст] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2020. – Vol. 35. – P. 456–465.

15 **Ding, Z. et al.** Ice monitoring on overhead lines using Φ-OTDR technology [Текст] // Optics Express. – 2018. – Vol. 26. – P. 12345–12356.

REFERENCES

1 **Mackay, D. S., Thompson, G.** Ice accretion on overhead transmission lines [Text] // Journal of Applied Meteorology. – 1969. – Vol. 8. – P. 123–130.

2 **Makkonen, L.** Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures [Text] // Cold Regions Science and Technology. – 1981. – Vol. 3. – P. 145–158.

3 **Lozowski, E. P., Stallabrass, J. R., Hearty, P. F.** The icing of an unheated, non-rotating cylinder. Part I: A simulation model [Text] // Journal of Climate and Applied Meteorology. – 1983. – Vol. 22. – P. 2053–2062.

4 **Ahti, K., Makkonen, L.** Ice accretion on wires [Текст] // Journal of Applied Meteorology. – 1982. – Vol. 21. – P. 1382–1394.

5 **Ashworth, R. A., Knight, C. A.** Ice crystal growth in the atmosphere [Text]. – New York : Academic Press, 1978. – 237 p.

6 **Lesins, G., Farzaneh, M., Lozowski, E.** Characteristics of ice accretion on overhead conductors [Text] // Atmospheric Research. – 1980. – Vol. 14. – P. 215–230.

7 **Howe, K. E.** Ice accretion measurements on Mount Washington [Text] // Journal of Applied Meteorology. – 1982. – Vol. 21. – P. 1005–1012.

8 **Dranevich, A. N.** Obledeneniye provodov liniy elektroperedachi [Icing of overhead power line conductors] [Text]. – Moscow : Energiya, 1971. – 120 p.

9 **Rudneva, T. V.** Gololednye nagruzki na provoda liniy elektroperedachi [Ice loads on overhead power line conductors] [Text]. – Moscow : Energoatomizdat, 1973. – 98 p.

10 **Baranovsky, N. V., Libersbakh, A. G.** Metody otsenki obledenenia provodov vozdushnykh liniy [Methods for evaluating icing of overhead line conductors] [Text]. – Moscow : Energiya, 1977. – 110 p.

11 **Bendel, V., Paton, B.** Obledenenie inzhenernykh konstruktsiy [Icing of engineering structures] [Text]. – Moscow : Mir, 1981. – 256 p.

12 **Langmuir, I., Blodgett, K. B.** A mathematical investigation of water droplet trajectories [Текст]. – Washington : U.S. Army Air Forces, 1946. – 45 p.

13 **Sun, Y. et al.** Distributed optical fiber sensing for ice detection on transmission lines [Text] // Sensors. – 2019. – Vol. 19. – P. 1–12.

14 **Xu, L. et al.** Ice thickness estimation on transmission lines based on temperature phase difference [Text] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2020. – Vol. 35. – P. 456–465.

15 **Ding, Z. et al.** Ice monitoring on overhead lines using Φ-OTDR technology [Text] // Optics Express. – 2018. – Vol. 26. – P. 12345–12356.

Поступило в редакцию 30.04.26.
Поступило с исправлениями 05.05.26.
Принято в печать 02.09.26.

**Ф. А. Ғабыл-Манапова[1], А. Б. Бекбаев[2], Р. Ш. Абитаева[3], А. Ф. Ишангалиева[4]*
[1,2,3,]Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық Техникалық-Зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[4]М-С. Бабажанов атындағы жалпы орта білім беретін мектебі, Қазақстан Республикасы, Батыс Қазақстан обл.
30.04.26 ж. баспаға түсті.
05.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
02.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖОҒАРЫ ВОЛЬТТЫ ЭЛЕКТР БЕРІЛІС ЖЕЛІЛЕРІНДЕГІ МҰЗДАНУДЫҢ ПАЙДА БОЛУЫН ЖӘНЕ ОНЫҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада әуе электр желілерінде мұздың қалай пайда болатыны және оның энергетикалық жүйенің қалыпты жұмысына қалай кедергі келтіретіні қарастырылады. Автор процестің физикалық жағына, атап айтқанда, мұздың қалай жиналатынына және оның сымдардың күйіне әсеріне тоқталады. Бұл жерде ауа райы, ылғалдылық пен жел басты факторлар болып табылады – желілердің қаншалықты тез мұздауы мен олардың сипаттамаларының нашарлауы дәл осыларға байланысты.

Сонымен қатар, мәтінде сымдардың жай-күйін бақылаудың түрлі әдістері талданады. Мұнда қарапайым көзбен шолып тексеру мен кескінді танитын камералардан бастап, арнайы датчиктерге дейінгі мүмкіндіктер сөз болады. Талшықты-оптикалық технологияларға ерекше назар аударылған. Олар өте дәл жұмыс істейді, электромагниттік кедергілерден қорықпайды және жағдайды өте алыс қашықтықтан бақылауға мүмкіндік береді.

Қорыта айтқанда, автор қолданыстағы мониторинг әдістерін жетілдіріп, әуе желілері мұзға шыдап, істен шықпауы үшін олардың конструкциясын барынша берік ету керек деген тұжырымға келеді. Алдағы зерттеулер осы диагностика тәсілдерін оңтайландыруға және қалың мұз жауғанда желілерді қауіпсіз пайдалану деңгейін арттыруға бағытталмақ. Зерттеу барысында алынған нәтижелерді қолайсыз ауа райы аймақтарындағы электр желілерін жобалау мен іске қосу кезінде тікелей қолдануға болады. Ал жұмыстың практикалық маңызы – электрмен жабдықтаудың сенімділігін арттырып, өндірістік қауіп-қатерді азайтуға мүмкіндік беретіндігінде.

Кілтті сөздер: Әуе электр беріліс желілері, көктайғақ, сенімділік, климаттық факторлар, мониторинг, диагностика, мұз жүктемелері, сымдардың тербелісі.

*F. A. Gabyl-Manapova[1], A. Bekbayev[2], R. Sh. Abitayeva[3], A. F. Ishangalieva[4]
[1,2,3]Satbayev University,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[4]Secondary School named after M-S. Babazhanova,
Republic of Kazakhstan, West Kazakhstan.
Received 30.04.26.
Received in revised form 05.05.26.
Accepted for publication 02.09.26.

INVESTIGATION OF ICE FORMATION ON HIGH-VOLTAGE POWER LINES AND ITS EFFECTS

This study looks at how ice forms on overhead power lines and why it causes problems for the electrical grid. It explains the physics behind ice buildup and how it changes the condition of the wires. Factors like weather, humidity, and wind are what mainly decide how fast the lines freeze and how much their performance drops.

The paper also reviews different ways to keep an eye on the lines. It covers basic visual checks and cameras that use image recognition, along with various sensors. A lot of focus is put on fiber-optic technology because it is accurate, does not get affected by electromagnetic interference, and can monitor the grid over long distances.

In the end, the author argues that just monitoring isn't enough. The power lines themselves need to be built stronger to handle the weight of the ice and avoid breaking. Future work will likely focus on improving these monitoring tools and keeping the grid running during bad storms. These findings are useful for designing and maintaining power lines in cold areas to help prevent outages and make the power supply more dependable.

Keywords: Overhead power lines, ice accumulation, reliability, climatic factors, monitoring, diagnostics, ice loads, conductor galloping.

МРНТИ 44.29.31
https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/233-254

С. С. Даутов[1], Б. Р. Кангожин[2], М. С. Жармагамбетова[3], *М. Б. Сатенова[4]
[1,2,3,4]Университет ALT Мұхаметжана Тынышпаева,
Республика Казахстан, г. Алматы.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2135-0790
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1023-9873
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3355-8293
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5778-2536
*e-mail: msb_madeka@mail.ru

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ПОМЕХИ В ЦЕПЯХ РЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДСТАНЦИИ 220 КВ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

В статье представлены результаты натурно-имитационных исследований высокочастотных дифференциальных помех, возникающих в контрольных кабелях микропроцессорных систем релейной защиты при подъёме потенциала заземляющего устройства высоковольтной электрической подстанции напряжением 220 кВ. Эксперимент выполнен на действующей подстанции ПС 220 кВ «№7» АО «KEGOC» с применением переносного генератора высокочастотных импульсов с диапазоном частот 0,5–2 МГц, обеспечивающего имитацию высокочастотной составляющей тока короткого замыкания без воздействия на технологический процесс. Существующие расчётные методы не всегда учитывают фактическое распределение потенциалов и импульсное сопротивление заземляющего устройства в реальных условиях эксплуатации. В связи с этим приоритетное значение приобретают натурные измерения.

Определены импульсные значения потенциала заземляющего устройства, рассчитан коэффициент передачи помехи во вторичные цепи и выполнен пересчёт к реальным значениям высокочастотной составляющей тока короткого замыкания. Установлено, что при определённых значениях импульсного сопротивления заземления уровень дифференциальной помехи может превышать допустимый порог 1 кВ для интерфейсов оборудования вторичных цепей подстанций.

Показана зависимость амплитуды наведённого напряжения от импульсного сопротивления заземлённого оборудования и предложены инженерные меры снижения уровня высокочастотных помех за счёт модернизации заземляющего устройства.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, электрическая подстанция 220 кВ, высокочастотная помеха, импульсное сопротивление заземления, дифференциальная помеха, вторичные цепи.

Введение

На современных электрических подстанциях (ЭП) высокого напряжения (ВН) 110–220 кВ микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (МРЗА) подключаются к оборудованию посредством контрольных кабелей, трассируемых в зоне действия интенсивных электромагнитных переходных процессов [1]. При коротком замыкании (КЗ) ток, протекающий через заземляющее устройство, вызывает подъём потенциала заземлённого оборудования [2; 3]. Наличие паразитных ёмкостных и индуктивных связей между заземляющими элементами и контрольными кабелями создаёт условия для проникновения высокочастотной составляющей тока короткого замыкания во вторичные цепи [4; 5]. Несмотря на применение экранированных кабелей и двустороннее заземление экранов, в реальных условиях ЭП возможно формирование дифференциальных (противофазных) помех, способных достигать уровней, сопоставимых с порогами помехоустойчивости интерфейсов МРЗА [6].

Существующие расчётные методы и компьютерное моделирование не всегда учитывают фактическое распределение потенциалов и импульсное сопротивление заземляющего устройства в реальных условиях эксплуатации [6; 7]. В связи с этим приоритетное значение приобретают натурные измерения, позволяющие количественно оценить уровень высокочастотных помех непосредственно на действующей ЭП ВН. В отечественных и зарубежных исследованиях неоднократно отмечалась роль импульсных характеристик заземления в формировании помех во вторичных цепях [7; 8; 9]. В частности, подобные явления электромагнитных помех во вторичных цепях подстанций до 400 кВ описаны в [10].

Вопросы чувствительности микропроцессорных устройств к импульсным и ВЧ воздействиям подробно исследованы [9; 10; 11]. На ЭП ВН это приводит к сбоям, отказам и ложным срабатываниям МРЗА.

Таким образом, чувствительность МРЗА к импульсным помехам при КЗ на ЭП ВН и несовершенство расчетных методов предопределило

цель настоящей работы: экспериментальное исследование уровней высокочастотных дифференциальных помех в контрольных кабелях ПС 220 кВ при имитации высокочастотной составляющей тока короткого замыкания.

Материалы и методы

Физика возникновения высокочастотных дифференциальных помех. Подъём потенциала заземляющего устройства при КЗ

При КЗ на ЭП (рисунок-1) значительная часть тока замыкания замыкается через заземляющее устройство (ЗУ). Горизонтальные элементы – распределённые сопротивления грунта, вертикальные ветви – токи растекания в грунт, точка КЗ – место замыкания на землю, зона нулевого потенциала - удалённая точка земли (бесконечность).

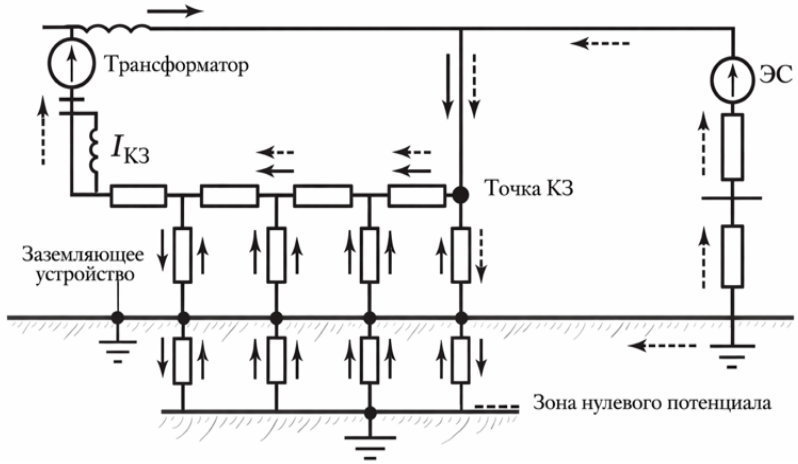


Рисунок 1 – Схема растекания тока
при однофазном замыкании на землю (КЗ)

В точке КЗ фазный провод соединяется с землёй. Возникает ток Iкз, который замыкается по контуру энергосистема → линия → точка КЗ → грунт → ЗУ подстанции → нейтраль трансформатора → источник. Ток не идет по одной линии – он растекается объемно. Грунт моделируется как цепочка продольных сопротивлений. Параллельные вертикальные сопротивления (растекание вниз).

В аварийном режиме мгновенное значение потенциала заземлённого оборудования относительно удалённой земли определяется выражением:

$$U_з(t) = I_{кз}(t) * Z_{имп}(f) \quad (1)$$

где: $I_{кз}(t)$ – ток короткого замыкания;

$Z_{имп}(f)$ – частотно-зависимое импульсное сопротивление заземляющего устройства.

В реальных энергосистемах структура тока короткого замыкания определяется параметрами сети, схемой заземления нейтрали и топологией узла, что подтверждается исследованиями [11; 12].

Частотно-зависимый характер импульсного сопротивления заземления подробно рассматривается в [11; 12]. Рост индуктивной составляющей импеданса заземляющей сети в диапазоне 0,1–5 МГц подтверждён экспериментально в работах [13; 14]. В отличие от установившегося режима, при наличии высокочастотной составляющей тока КЗ (0,1–5 МГц) заземляющее устройство (рисунок – 2) проявляет выраженные распределенные индуктивные и емкостные свойства, что приводит к увеличению импульсного сопротивления по сравнению с низкочастотным сопротивлением растеканию.

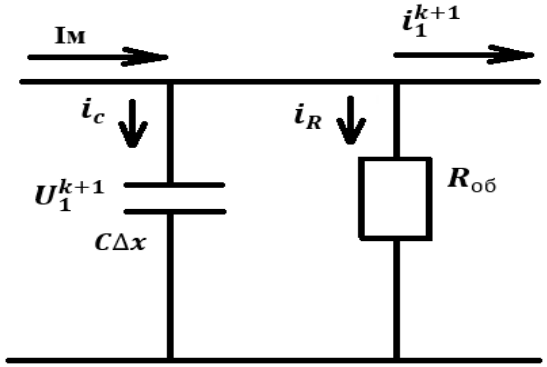


Рисунок 2 – Эквивалентная схема участка вторичной цепи при воздействии тока КЗ

Представлена эквивалентная схема участка вторичной цепи (контрольного кабеля или входа устройства РЗА) при воздействии тока короткого замыкания и наведённого потенциала корпуса. Схема содержит: продольную линию (верхний проводник) с током $I_{кз}$ короткого замыкания, потенциал узла U_1^{k+1}, паразитную ёмкость CΔx, сопротивление объекта $R_{об}$, токи: ёмкостный I_c, активный I_r, продольный ток линии I_1^{k+1}. Нижняя линия – заземляющая шина (опорный потенциал).

Ток короткого замыкания $I_{кз}$ протекает по первичной цепи (шина, конструкция, корпус оборудования) и создаёт высокочастотную составляющую, импульсное повышение потенциала корпуса и распределённое поле вдоль трассы кабеля. Потенциал узла U^{k+1} это локальный потенциал корпуса, экрана, проводника относительно земли на участке I^{k+1}. При импульсном воздействии следующее выражение:

$$U(t)=Z_{имп}(\omega) * Iкз(t) \quad (2)$$

где: Zg(ω) – импульсное сопротивление заземления.

Паразитная ёмкость CΔx представляет распределённую ёмкость между жилой и экраном, между экраном и землёй или между корпусом оборудования и землёй. Через неё протекает ток смещения:

$$I_c(t) = C_{экв}\frac{dU_з(t)}{dt} \quad (3)$$

где: $I_c(t)$ – емкостный ток;

$C_{экв}$ – эквивалентная емкость (заземляющего устройства);

$U_з(t)$ – напряжение;

$\frac{dU_п(t)}{dt}$ – производная напряжения по времени.

При крутых фронтах КЗ (большое dU/dt) ёмкостный ток может достигать значительных значений даже при малой ёмкости.

Сопротивление объекта $R_{об}$ – это эквивалент входного сопротивления микропроцессорного устройства, измерительного входа, вторичной цепи РЗА.

Через него протекает ток:

$$I_R = U_{1K} + R_{об} \quad (4)$$

Этот ток формирует дифференциальное напряжение на входе устройства.

Продольный ток I^{k+1} +1 представляет часть наведённого тока, распространяемого вдоль линии. Он формирует продольную разность потенциалов, не симметрию, дифференциальную составляющую помехи.

При протекании $I_{кз}$ возникает импульсный подъём потенциала корпуса. Через CΔx протекает ток смещения, часть тока замыкается через $R_{об}$. Формируется дифференциальное напряжение на входе устройства.

Если:

$$U_{прик} \infty Z_{имп} \quad (5)$$

где: $U_{прик}$ – напряжение прикосновения;

возможны ложные срабатывания, сбой регистрации, нарушение селективности РЗА.

С точки зрения ЭМС схема отражает ёмкостный механизм связи, зависимость помехи от dU/dt, влияние импульсного сопротивления заземления, преобразование синфазного возмущения в дифференциальное. В результате формируется кратковременный подъём потенциала (Ground Potential Rise, GPR) на корпусах оборудования, к которым подключены вторичные цепи.

Механизм передачи помехи в контрольный кабель.

Контрольный кабель, соединяющий оборудование с панелью РЗА, имеет ёмкость между жилой и экраном Сэ, ёмкость между экраном и землёй Сэз, продольную индуктивность проводников L (рисунок-3). При воздействии высокочастотного потенциала Uз(t) на корпус оборудования возникает переменное электрическое поле, индуцирующее ток смещения:

$$I_c = C_{экв} \frac{dU_з}{dt} \quad (6)$$

Даже при двустороннем заземлении экрана, асимметрии трассировки, различия импедансов заземления и распределённый характер ЗУ приводят к формированию продольной разности потенциалов вдоль кабеля. В результате во вторичной цепи возникает дифференциальное напряжение:

$$U_d = k_t * U_з \quad (7)$$

где: k_t – коэффициент передачи, учитывающий параметры кабеля, способ заземления экрана и частоту сигнала.

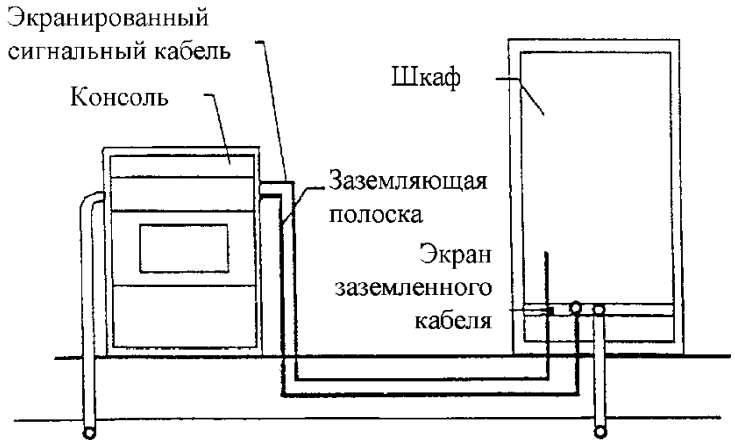


Рисунок 3 – Индукция ВЧ-напряжения в контрольном кабеле при двустороннем заземлении экрана

Процессы наведения помех в низковольтных кабелях под воздействием коммутационных и КЗ-процессов исследованы в [14]. Роль ёмкостных связей и распределённого импеданса вторичных цепей описана в [10; 15].

Высокочастотный потенциал корпуса Uз(t) создаёт переменное электрическое поле и индуцирует ток смещения I_c. Ток смещения замыкается через экран и землю. Из-за асимметрии трассировки, различия импедансов заземления, распределённого характера ЗУ вдоль экрана формируется продольная разность потенциалов ΔU(X). Это приводит к появлению во вторичной цепи дифференциального напряжения U_d.

Роль импульсного сопротивления заземления.

Влияние характеристик заземляющего устройства на электромагнитную обстановку подстанций рассмотрено в [8].

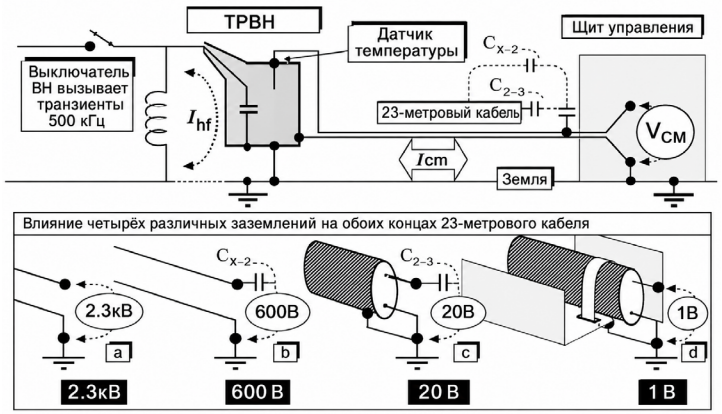


Рисунок 4 – Влияние импульсного сопротивления заземления и способа заземления экрана на уровень ВЧ помех: верхняя часть схемы – механизм возникновения помехи, нижняя часть-влияние способа заземления экрана

На рисунке 4 показана типичная ситуация на подстанции. Выключатель ВН формирует ВЧ-транзиенты (до ~500 кГц). В трансформаторе возникает высокочастотная составляющая тока I_h. Этот ток замыкается через заземляющее устройство (ЗУ). Из-за конечного и частотно-зависимого импульсного сопротивления заземления

$$U_з = I_{вч} * Z_{имп}(\omega) \tag{8}$$

где: $I_{вч}$ – ток высокой частоты (high frequency current);

Возникает подъём потенциала земли (GPR). Потенциал корпуса оборудования изменяется во времени. Через паразитные ёмкости «жила – экран» и «экран – земля» возникает ток смещения:

$$I_{cm} = C_d \frac{dU_з}{dt} \tag{9}$$

По контрольному кабелю ток распространяется в сторону щита управления. В щите возникает синфазное напряжение Vсм. Именно это напряжение далее преобразуется в дифференциальную помеху во вторичных цепях РЗА.

На нижней части (рисунок-4) показано влияние способа заземления экрана. Показаны четыре варианта оконцевания экрана кабеля:

а) экран не заземлён и работает как антенна дает 2.3 кВ. Это максимальный уровень синфазной помехи и является наихудшим вариантом.

б) экран заземлён, с одной стороны, дает результат 600 В. Снижается уровень помех, но возникает продольная разность потенциалов. При длинных трассах остаётся высокий риск ЭМС-нарушений.

в) экран заземлён с двух сторон – результат 20 В. При этом варианте замыкается ток смещения, происходит существенное снижение наведённого напряжения. Однако возможны токи по экрану при GPR.

г) экран заземлён на 360° (правильный ВЧ монтаж) дает результат 1 В. Контакт по окружности (а не «хвостиком») дает минимальную индуктивность заземления происходит эффективное подавление ВЧ помех. Данный вариант соответствует требованиям IEC 61850 / EMC good practice. Экспериментальное подтверждение зависимости уровня помех от $Z_{имп}$ приведено в [14; 15].

Из выражения $U_з = I_{вч} * Z_{имп}(\omega)$ следует, что уровень наведённой помехи прямо пропорционален импульсному сопротивлению заземления. Следовательно, при увеличении $Z_{имп}$ возрастает GPR, увеличивается, усиливается ток смещения через паразитные ёмкости, возрастает дифференциальная помеха во вторичных цепях.

Таким образом, ключевым параметром, определяющим уровень ВЧ помехи, является не только амплитуда высокочастотной составляющей тока КЗ, но и частотно-зависимое импульсное сопротивление заземляющего устройства. Требования к устойчивости оборудования подстанций к колебательным процессам установлены в ГОСТ IEC 61000-6-5-2017. За критерий электромагнитной уязвимости принято условие опасного воздействия:

$$U_d \geq U_{кр} \tag{10}$$

где: $U_{lim} \approx 1$ кВ для подстанций.

Оно служит для оценки риска воздействия на микропроцессорные устройства. При несоблюдении критерия электромагнитной уязвимости условия возможны ложные срабатывания РЗА, некорректная регистрация осциллограмм, нарушение селективности, сбои в цифровых интерфейсах (GOOSE, SV, Ethernet). Проблемы помехоустойчивости SMART-устройств на ПС рассмотрены в [16]. Требования по обеспечению ЭМС на подстанциях Республики Казахстан регламентируются также ГОСТ МЭК 61000-6-5-2017.

Особенности ЭМС SMART-устройств подстанций высокого напряжения рассмотрены в [9].

Объект исследования и экспериментальная методика.

Экспериментальные исследования выполнены на действующей ПС 220 кВ «№7» ОРУ 220/110 кВ. Приведена электрическая схема ПС-220 кВ (рисунок-5). Измерения проводились на ОРУ-220 кВ (автотрансформаторы АТ-1, АТ-2), ОРУ-110 кВ (выключатели Л-136, Л-123, Л-124, Л-141).

Вторичные цепи были представлены экранированными контрольными кабелями, подключёнными к панелям микропроцессорной релейной защиты и автоматики (РЗА). Для исключения воздействия на технологический процесс использовались резервные жилы кабелей, не задействованные в действующих цепях управления. Методика имитации ВЧ составляющей тока КЗ и натурные измерения на ПС подробно описаны в работах [15; 16].

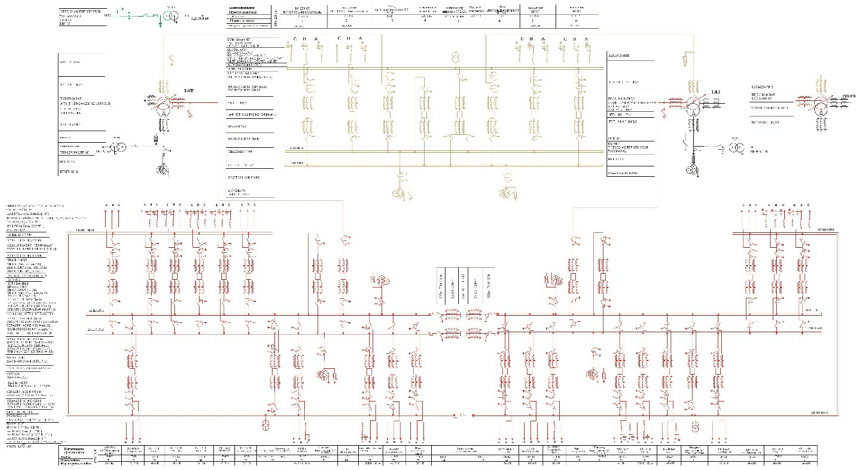


Рисунок 5 – Электрическая схема ПС 220 кВ «№7»

Приведена схема имитации ВЧ составляющей тока КЗ (рисунок-6) Принципы измерения импульсного сопротивления – согласно IEEE Std 81-2012 [16]. Программное моделирование переходных процессов – на основе подходов, изложенных в [17].

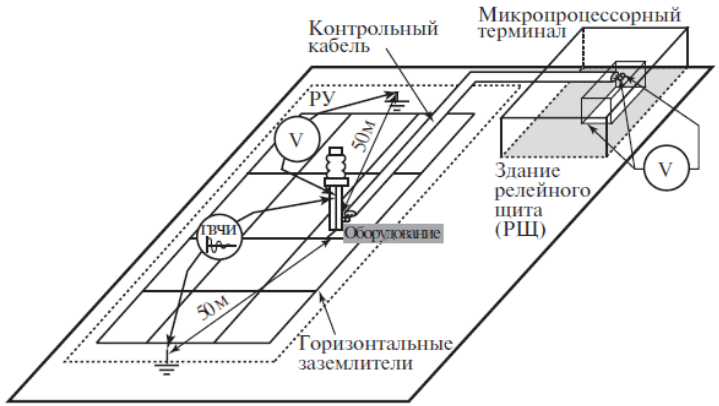
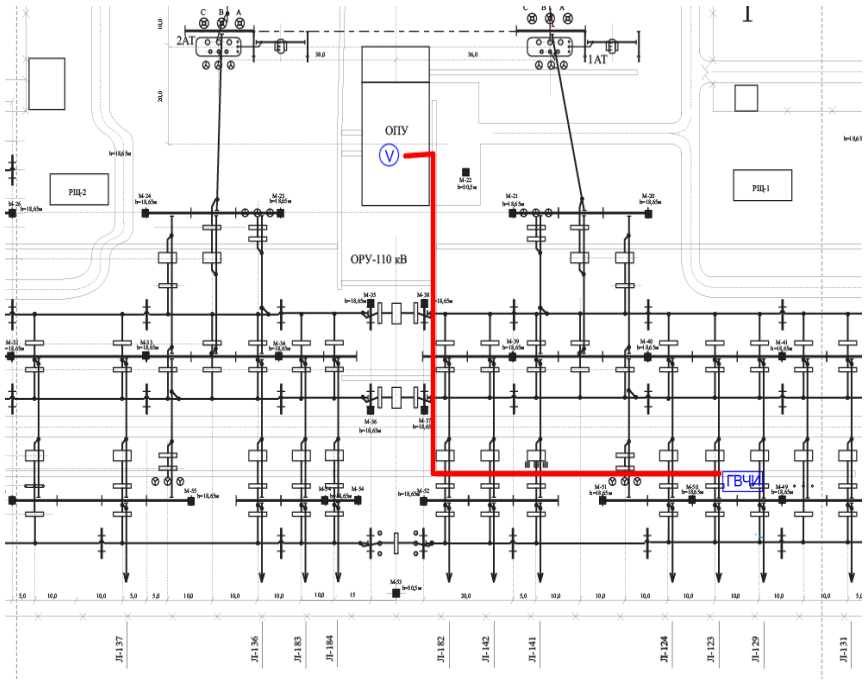


Рисунок 6 – Схема имитации ВЧ составляющей тока КЗ

В реальных условиях короткого замыкания ток содержит высокочастотные компоненты, обусловленные коммутационными процессами, дуговыми явлениями, неоднородностями заземляющей сети, отражениями волн в шинных системах. Для воспроизведения этих процессов использовался переносной генератор высокочастотных импульсов (ГВЧИ), формирующий затухающие колебательные токи в диапазоне частоты: 0,5; 1; 2 МГц, амплитуда тока, до 10 А, форма сигнала: затухающая колебательная волна. Генератор подключался одним выводом к заземлённому корпусу оборудования, вторым выводом – к удалённой земле (на расстоянии ≥ 50 м). На фрагменте плана ПС 220 кВ «№ 7» показана трасса одного из контрольных кабелей (рисунок – 7). Такая схема обеспечивает формирование неравномерного распределения потенциала на высоких частотах и воспроизводит подъём потенциала заземляющего устройства (GPR). Высокочастотные составляющие, возникающие при коммутации разъединителей и выключателей, подробно исследованы в [16].



ГВЧИ – точка подключения генератора (Выключатель Л-123),
V – точка подключения осциллографа (шкаф терминала РЗА),
---- трасса контрольного кабеля
Рисунок 7 – Фрагмент плана ПС 220 кВ «№7»

Исследования проводились сертифицированным поверенным измерительным оборудованием. В эксперименте применялись осциллограф: FLUKE 190C ScopeMeter с полосой пропускания: до 200 МГц, частотой дискретизации: до 2,5 GS/s, входным импедансом 1 Мом. Для измерения импульсного напряжения использовался импульсный вольтметр ВИ-5М с пределом измерения до 10 кВ и времени нарастания ≤ 20 нс. Погрешность измерения напряжения не превышала ¥3 %.

Ток генератора контролировался встроенной измерительной системой ГВЧИ с погрешностью ¥5 %.

Эксперименты проводился в следующей последовательности:

– фиксировались фоновые уровни помех при выключенном генераторе.
– устанавливались параметры импульса (амплитуда, частота).
– генерировался ВЧ-ток в заземляющем устройстве.

Одновременно измерялись импульсное напряжение на заземляющем оборудовании U_g и наведённое напряжение в контрольной жиле U_d. Измерение потенциала ЗУ производилось относительно удалённой земли, расположенной на расстоянии не менее 50 м от точки ввода тока. Для каждой конфигурации выполнялось не менее трёх повторных измерений. Разброс результатов не превышал 8 %, что подтверждает воспроизводимость.

Результаты и обсуждение

Значения импульсного сопротивления заземляющего устройства определялось как:

$$Z_{имп} = \frac{U_{имп}}{I_{имп}} \tag{11}$$

где: $U_{имп}$ – максимальное значение импульсного напряжения,
$I_{имп}$ – амплитуда импульсного тока генератора.

Полученные значения отражают частотно-зависимое поведение заземляющего устройства в диапазоне 0,5-2 МГц.

Коэффициент передачи дифференциальной помехи определялся как:

$$k_t = \frac{U_d}{U_{имп}} \tag{12}$$

Данный параметр характеризует ослабление (или усиление) импульсного воздействия при распространении по контрольному кабелю.

Измеренные значения пересчитывались к расчётной амплитуде высокочастотной составляющей реального тока КЗ:

$$U_{d,расч} = k_t * Z_{имп} * I_{вч} \tag{13}$$

Расчёт $I_{вч}$ выполнялся с использованием специализированной программы INTEFERENCE моделирования переходных процессов.

В ходе эксперимента для каждого объекта определялось импульсное сопротивление заземления в диапазоне частот 0,5-1 МГц. Полученные значения показали для оборудования ОРУ-220 кВ: $Z_{имп}$ =4,3-7,1 Ом, для оборудования ОРУ-110 кВ: $Z_{имп}$ =2,7-12,6 Ом. Максимальные значения фиксировались на отдельных присоединениях при частоте 1 МГц. Установлено, что увеличение частоты приводит к росту импульсного сопротивления, что связано с проявлением индуктивных свойств заземляющего контура.

Осциллографирование показало наличие затухающих высокочастотных колебаний в контрольных кабелях при каждом включении генератора. Характерные высокочастотные помехи на контрольных кабелях при генерации ВЧ-составляющей тока КЗ приведены на осциллограммах (рисунок– 8).

Обработка осциллограмм дала следующие характерные параметры: длительность колебательного процесса: 5-15 мкс, частота доминирующей компоненты: 0,5-1 МГц, форма сигнала - затухающая синусоидальная волна. После пересчёта к реальному значению высокочастотной составляющей тока КЗ были получены максимальные уровни дифференциальных помех (таблица 1).

Таким образом, в ряде присоединений уровень помехи превышает порог 1 кВ, установленный для интерфейсов вторичных цепей подстанций [10].

Спектральная обработка сигналов методом FFT показала максимум энергии в диапазоне 0,4–1,2 МГц, снижение амплитуды на частотах выше 2 МГц, совпадение доминирующих частот с частотами, задаваемыми генератором. Это подтверждает корректность методики имитации высокочастотной составляющей тока КЗ.

Таблица 1 – Значения высокочастотной составляющей тока короткого замыкания, полученные в ходе эксперимента, соответствуют максимальным уровням дифференциальных помех

Место измерения	**Наибольшее напряжение на устройстве (Расчетно-экспериментальные воздействия), кВ**	**Допустимый уровень воздействия, кВ МЭК 61000-4-12-96**	**Выводы**	**Классификация риска**
Синфазная помеха				
АТ-2 (газ. защита)	0,5-0,75 кВ	2 кВ	В пределах нормы	низкий риск
АТ-2 (ТВТ-220)	0,1-0,13 кВ	2 кВ	Значительно ниже предела	Очень низкий риск
ТВТ Л-432	1,65 кВ	2 кВ	На уровне порога	Средний риск
ЭГВ Л-123	1,79 кВ	2 кВ	На уровне порога	Средний риск
ТВТ Л-102	2,7 кВ	2 кВ	Выше нормы	Высокий риск
ЭГВ Л-142	1,24 кВ	2 кВ	На уровне порога	Средний риск

ТВТ Л-142	1,76 кВ	2 кВ	На уровне порога	Средний риск
ТВТ Л-182	1,56	2 кВ	На уровне порога	Средний риск
ЭГВ Л-102	3,43 кВ	2 кВ	Значительно выше нормы	Очень высокий риск
ЭГВ Л-184	0,22 кВ	2 кВ	Значительно ниже предела	Очень низкий риск
Противофазная помеха				
ЭГВ ВО-1	0,69 кВ	1 кВ	На уровне порога	Средний риск
ЭГВ Л-433	0,09 кВ	1 кВ	Значительно ниже предела	Очень низкий риск
ТВТ ВО-1	0,58 кВ	1 кВ	На уровне порога	Средний риск
ТВТ Л-123	1,13 кВ	1 кВ	Выше нормы	Высокий риск
ЭГВ Л-123	2,42 кВ	1 кВ	Значительно выше предела	Очень высокий риск
ЭГВ Л-141	0,77 кВ	1 кВ	На уровне порога	Средний риск
ТВТ Л-141	0,36 кВ	1 кВ	ниже предела	низкий риск
ТВТ Л-102	2,53 кВ	1 кВ	Значительно выше предела	Очень высокий риск

Сравнение полученных данных показало линейную зависимость: $U_{прик} \infty Z_{имп}$:

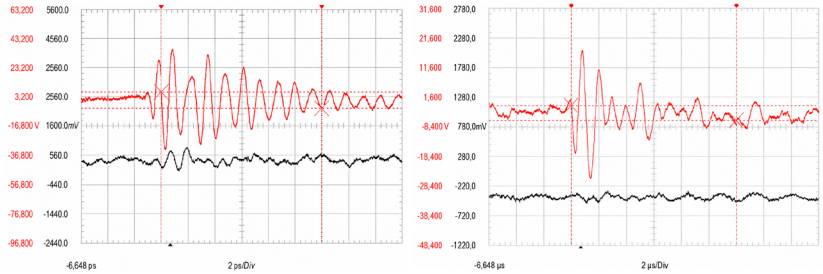
– при $Z_{имп}$=15,9 Ом (ЭВГ-Л-123, 0,5 МГц) зарегистрировано превышение 2,42 кВ;

– при $Z_{имп}$=3,6 Ом (ЭВГ-Л-136, 0,5 МГц) превышения порога не зафиксировано.

Это подтверждает ключевую роль импульсного сопротивления заземления в формировании дифференциальной помехи.

Сравнение полученных значений с допустимым уровнем 1 кВ показало в 30–35 % исследованных конфигураций наблюдается превышение допустимого порога. При этом наиболее уязвимыми являются цепи управления выключателей и автотрансформаторов на ОРУ-110 кВ. Таким образом, даже при двустороннем заземлении экранов контрольных кабелей не исключается формирование дифференциальной помехи, превышающей нормативные значения. Полученные значения импульсного сопротивления соответствуют диапазонам, приведённым в исследованиях [10]. Спектральные характеристики ВЧ процессов в подстанциях сопоставимы с данными

[5; 17]. Превышение уровня 1 кВ подтверждает необходимость оценки помехоустойчивости согласно [16].



а) б)

а – в цепях управления ЭГВ Л-123 (0,5 МГц);
б – в цепях АТ-2 (0,5 МГц)
Рисунок 8 – Характерные высокочастотные помехи на контрольных кабелях при генерации ВЧ-составляющей тока КЗ

Полученные данные показывают, что уровень дифференциальной помехи во вторичных цепях определяется произведением двух ключевых факторов:

$$U_d = k_t * Z_{имп} * I_{вч} \quad (14)$$

Экспериментально установлено, что при увеличении импульсного сопротивления заземлённого оборудования возрастает как потенциал GPR, так и амплитуда наведённой дифференциальной помехи. Результаты согласуются с ранее опубликованными данными по помехоустойчивости устройств автоматизированных систем энергообъектов [15; 16]. Таким образом, критическим параметром является не только амплитуда тока КЗ, но и высокочастотные свойства заземляющего устройства.

Анализ результатов показал, что превышение уровня 1 кВ связано с:

– повышенным импульсным сопротивлением отдельных присоединений;
– наличием распределённой индуктивности заземляющих проводников;
– асимметрией трассировки контрольных кабелей;
– наличием паразитных ёмкостных связей между экраном и жилой кабеля.

Даже при двустороннем заземлении экранов полностью исключить дифференциальную составляющую невозможно вследствие неоднородности потенциалов вдоль кабельной трассы.

На основании полученных результатов предлагаются следующие меры.

Снижение импульсного сопротивления заземления наиболее эффективной мерой является уменьшение путём:

– уплотнения заземляющей сетки;
– применения дополнительных горизонтальных и вертикальных электродов;
– сокращения длины токопроводящих соединений;
– использования проводников с меньшим индуктивным сопротивлением;
– организации локальной ВЧ-сетки вокруг критического оборудования.

Снижение импульсного сопротивления приводит к пропорциональному уменьшению GPR и наведённой дифференциальной помехи.

Оптимизация схемы заземления экранов кабелей рекомендуется:

– анализ распределения потенциалов вдоль трассы;
– минимизация разности потенциалов между точками подключения экрана;
– исключение параллельных контуров с различными импедансами;
– применение дополнительного уравнивания потенциалов в зоне ввода кабеля в панель РЗА.

Минимизация паразитных связей:

– разделение силовых и контрольных трасс;
– увеличение расстояния между заземляющими шинами и вторичными кабелями;
– использование металлических кабельных лотков, подключённых к общей системе уравнивания потенциалов.

Учёт ВЧ-составляющей при проектировании ЗУ.

Традиционный расчёт заземляющих устройств ориентирован на условия электробезопасности и токи промышленной частоты.

Результаты исследования показывают необходимость дополнительной оценки высокочастотного импульсного сопротивления при проектировании подстанций 220/110 кВ.

Практическая значимость результатов.

Полученные экспериментальные данные позволяют:

– количественно оценивать риск превышения допустимого уровня дифференциальной помехи;
– определять наиболее уязвимые присоединения;

– обосновывать модернизацию заземляющего устройства;

– использовать импульсное сопротивление как диагностический параметр.

Необходимость учёта ВЧ-характеристик ЗУ при проектировании подчёркивается в [17].

Предложенный подход может быть применён при техническом обследовании действующих подстанций без вмешательства в их технологический режим.

Выводы

В результате натурно-имитационных исследований на подстанции ПС 220 кВ «№7» установлено:

При имитации высокочастотной составляющей тока короткого замыкания формируется подъём потенциала заземляющего устройства, достигающий значений, приводящих к возникновению дифференциальных помех во вторичных цепях.

В ряде конфигураций уровень помехи превышает допустимое значение 1 кВ для интерфейсов контрольных кабелей.

Ключевым параметром, определяющим амплитуду помехи, является импульсное сопротивление заземления оборудования.

Снижение импульсного сопротивления и оптимизация схемы заземления экранов кабелей позволяют существенно уменьшить уровень высокочастотных дифференциальных помех.

Полученные результаты подтверждают необходимость учёта высокочастотных характеристик заземляющих устройств при проектировании и модернизации подстанций высокого напряжения.

REFERENCES

1 **Ramdani, M., Sicard, E., Boyer, A., Ben, D.S., Whalen, J.J., Hubing Todd, H. Coenen M., Wada O.** The Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits-Past, Present and Future // IEEE Trans. EMC, 2009. [Electronic resource] – https://hdl.handle.net/2433/109813

2 **Xuehai, G., Jinliang, H.** «Electromagnetic Interference on Secondary Systems of Substation Caused by Short-circuit Fault» // 2007 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Qingdao, China, 2007. – P. 206–211 – https://doi.org/10.1109/ELMAGC.2007.4413467

3 **Ng, D.K.S., Barker, R. J.** "Effect of shield termination on conducted emissions in cable harnesses" // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – Vol. 54. – no. 1. – P. 169–177, Feb. 2012. [Electronic resource]. – https://ieeexplore.ieee.org/document/6378447

4 **Kangozhin, B. R., Dautov, S. S.** Kazakh Institute of Technical Development (KITR) LLP. Developed projects [Electronic resource]. – Access mode: https://kitr.kz/projects (Date of access: 24.02.2025)

5 **Kangozhin, B. R., Dautov, S. S.** "Electromagnetic Compatibility": A Textbook. Almaty : Kazakh University Publishing House, 2020. – 192 p.

6 **Kangozhin, B. R., Dautov, S. S.** Research report on «Coordination of Noise Immunity of SMART Devices in the Automated Control System» at KEGOC JSC substations using the example of the 500 kV TsGPP, 500 kV Shymkent, 220 kV Kuibyshevskaya, and 220 kV No. 7 substations, 2024.

7 **Kangozhin, B.R., Dautov S.S., Zhalgabayev, S., Nurmakhanova, A., Bakyt G. A.** Computational and Experimental Method for Determining the Current in the Braid of a Control Cable During a Short Circuit // Applied Sciences. – 2025. – 15(19). – 10379. – https://doi.org/10.3390/app151910379.

8 **Kangozhin, B. R., Baimuratov, O. A., Zharmagambetova, M. S., Dautov, S. S., Kangozhin, D. B.** Noise immunity of devices of automated systems for technological control of energy facilities in the Almaty region // SERIES «Advances in Intelligent Systems and Computing» [Electronic resource]. – https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-87675-3_17.

9 **Carrsco, G.** «Electromagnetic interference in substation Jose up to 400/115 kV» // in Proc. IEEE Transmission & Distribution Conference and Exposition. – P. 1–6. – Aug. 2006

10 **Wu, J.** Microcontroller susceptibility variations to EFT burst during accelerated aging // Microelectronics Reliability. – 2016. – 64. – P. 210–214

11 **Benfica, J., Vargas, F., Soares, M.F., Schramm D.** Conducted EMI susceptibility analysis of a COTS processor as function of aging. – 2020 Microelectronics Reliability. – 114. – 113884. – https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113884

12 **Linjing Fan, Xudong Zu, Zhengxiang.** Huang Interferences of Electromagnetic Pulses on Microcontroller Units. Appl. – 2023. – Sci. 2023. – 13(14). – 8190. – https://doi.org/10.3390/app13148190

13 **Sun, S.** Research on Measures to Limit Short-Circuit Current by Changing the Structure of the Power Grid // Energies. – 2025. – 18(8). – 2098. – https://doi.org/10.3390/en18082098

14 **Li, L.** "Location method of single line-to-ground faults in low-resistance-grounded distribution networks" International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023. – https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108777

15 **Bo, Zhang, Jinliang, He, Yukuan, Jiang, Qian Li and Leishi Xiao.** «Experimental research on interference in secondary cable from short-circuit current in substations» 2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA), Balneario Camboriu, Brazil. – 2015. – P. 137–140. – https://doi.org10.1109/SIPDA.2015.7339298

16 **Kangozhin, B.R., Zharmagambetova, M.S., Dautov, S.S.** Switching impulse interference at a traction substation // Industrial transport of Kazakhstan, 2020 – No. 3 (68). – ISSN 1814-5787, 70–76 p.

17 **Kangozhin, B.R., Zharmagambetova, M.S., Dautov, S.S., Baltash, O.Zh.** The influence of cable shielding on the EMC of signaling and interlocking devices // Vestnik KazATK No. 2 (113), 2020. – ISSN 1609-1817, 256–263 p.

Поступило в редакцию 26.04.26.
Поступило с исправлениями 25.05.26.
Принято в печать 31.08.26.

С. С. Даутов[1], Б. Р. Кангожин[2],
*М. С. Жармағамбетова[3],*М. Б. Сатенова[4]*
[1,2,3,4]Мұхаметжан Тынышбаев атындағы ALT Университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
26.04.26 ж. баспаға түсті.
25.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚЫСҚА ТҰЙЫҚТАЛУ КЕЗІНДЕ 220 КВ ЭЛЕКТР ҚОСАЛҚЫ СТАНЦИЯСЫНЫҢ ҚОРҒАНЫС ЖӘНЕ АВТОМАТТАНДЫРУ ТІЗБЕКТЕРІНДЕГІ ЖОҒАРЫ ЖИІЛІКТІ КЕДЕРГІЛЕР

Мақалада жоғары кернеулі электр қосалқы станциясының жерге тұйықталу құрылғысының потенциалы көтерілген кезде микропроцессорлық релелік қорғаныс жүйелерінің бақылау кабельдерінде пайда болатын жоғары жиілікті, дифференциалды кедергілердің табиғи имитациялау зерттеу нәтижелері ұсынылған. Тәжірибе технологиялық үдеріске әсер етпейтін, қысқа тұйықталу тоғының жоғары жиілікті құрамын имитациялайтын 0,5-2 МГц жиіліктегі қозғалмалы, жоғары жиілікті импульстік генераторды пайдалану арқылы «KEGOK» АҚ Шымкенттегі іске қосылып тұрған 500 кВ қосалқы станциясында жүргізілді. Қолданыстағы есептеу

әдістері нақты жұмыс жағдайларында жерге қосу құрылғысының нақты әлеуетті таралуын және импульстік кедергісін әрқашан ескере бермейді. Сондықтан, заттай өлшемдер басымдыққа ие болуда.

Жерге қосу құрылғысының потенциалының импульстік мәндері анықталды, екінші реттік тізбектерге кедергілердің берілу коэффициенті есептелді. Қысқа тұйықталу тоғының жоғары жиілікті құрамының нақты мәндеріне қайта есептеу жүргізілді. Зерттеу нәтижесінде импульстік жерге тұйықтау кедергісінің белгілі бір мәндерінде қосалқы станциялардың екінші реттік тізбектерінің интерфейстері үшін дифференциалды кедергі деңгейі 1 кВ рұқсат етілген шегінен асып кетуі мүмкін екендігі анықталды.

Индукцияланған кернеу амплитудасының жерге қосылған жабдықтың импульстік кедергісіне тәуелділігі көрсетілген және жерге қосу құрылғысын жаңарту арқылы жоғары жиілікті кедергі деңгейін төмендетуге арналған инженерлік шаралар ұсынылған.

Кілтті сөздер: электромагниттік үйлесімділік, 500 кВ электрлік қосалқы станция, жоғары жиілікті кедергілер, импульстік жерге тұйықтау кедергісі, дифференциалды кедергілер, екінші реттік тізбектер.

S. S. Dautov[1], B. R. Kangozhin[2],
*M. S. Zharmagambetova[3], *M. B. Satenova[4]*
[1,2,3,4]Mukhametzhan Tynyshpayev ALT University,
Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 26.04.26.
Received in revised form 25.05.26.
Accepted for publication 31.08.26 .

HIGH-FREQUENCY INTERFERENCE IN THE PROTECTION AND AUTOMATION CIRCUITS OF A 220 KV ELECTRICAL SUBSTATION DURING SHORT CIRCUITS

This article presents the results of a full-scale simulation study of high-frequency differential interference occurring in the control cables of microprocessor-based relay protection systems during a grounding potential rise at a high-voltage electrical substation. The experiment was conducted at the operating 500 kV Shymkent substation of JSC KEGOK using a portable high-frequency pulse generator with frequencies

of 0.5–2 MHz, simulating the high-frequency component of a short-circuit current without affecting the process. Existing calculation methods do not always take into account the actual potential distribution and impulse resistance of the grounding device under real operating conditions. Therefore, in-kind measurements are becoming a priority.

The pulsed potential values of the grounding device were determined, the noise transfer coefficient to secondary circuits was calculated, and the high-frequency component of the short-circuit current was converted to actual values. It was established that, at certain values of the pulsed grounding resistance, the differential noise level may exceed the permissible threshold of 1 kV for substation secondary circuit interfaces.

The dependence of the induced voltage amplitude on the pulsed resistance of grounded equipment is demonstrated, and engineering measures are proposed for reducing the level of high-frequency noise by upgrading the grounding device.

Keywords: electromagnetic compatibility, 500 kV electrical substation, high-frequency interference, impulse grounding resistance, differential interference, secondary circuits.

МРНТИ 44.37.29

http://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/255-267

М. А. Добренко[1], Д. Р. Корамбаев[2], И. А. Хажин[3], М. В. Ярославцев[4], М. Т. Азаматов[5]

[1,2,3,4,5]Торайгыров университет,
Республика Казахстан, г. Павлодар.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3348-9503
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-8355-3562
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-5067-607X
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4666-1296
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6956-0822
*e-mail: maksimka.dobrenko@mail.ru

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С ПИТАНИЕМ ОТ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В статье рассматривается разработка и имитационное моделирование гибридной системы электроснабжения электромобильной платформы, интегрирующей фотоэлектрические преобразователи с электрохимическими накопителями энергии. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения автономности электромобилей и снижения их зависимости от стационарной зарядной инфраструктуры посредством утилизации возобновляемых источников энергии непосредственно в процессе эксплуатации транспортного средства.

Представлена функциональная схема системы, реализованная в среде MATLAB/Simulink, включающая фотоэлектрическую батарею суммарной мощностью более двух киловатт, тяговую аккумуляторную батарею и электропривод постоянного тока, соединенные через два каскадно включенных понижающих преобразователя постоянного напряжения. Особое внимание уделено разработке адаптивного алгоритма отслеживания точки максимальной мощности на основе метода возмущения и наблюдения с переменным размером шага, обеспечивающего быструю сходимость при изменении условий освещенности и высокую точность позиционирования рабочей точки фотоэлектрических модулей.

Результаты имитационного моделирования подтверждают эффективность предложенной архитектуры системы и корректность работы алгоритмов управления энергетическими потоками. Анализ переходных процессов демонстрирует быстрое достижение точки максимальной мощности солнечных панелей, стабильность напряжения аккумуляторной батареи и плавный характер разгона тягового электропривода. Разработанная система создает основу для внедрения технологий автономного энергоснабжения электромобилей на базе возобновляемых источников энергии и способствует развитию экологически чистого транспорта.

Ключевые слова: гибридная система электроснабжения, электромобиль, фотоэлектрическая батарея, оптимальная система управления, имитационное моделирование, возобновляемые источники энергии.

Введение

Современные тенденции развития автомобильного транспорта характеризуются интенсивным переходом от традиционных двигателей внутреннего сгорания к электрическим силовым установкам, обусловленным необходимостью снижения выбросов парниковых газов и повышения энергетической эффективности транспортных средств. Однако применение исключительно аккумуляторных систем электропитания сопряжено с существенными ограничениями по запасу хода, длительности зарядки и зависимости от стационарной инфраструктуры электроснабжения, что препятствует широкому распространению электромобилей в регионах с недостаточно развитой зарядной инфраструктурой [1].

Интеграция фотоэлектрических преобразователей в конструкцию транспортных средств представляет перспективное направление повышения автономности электромобилей посредством утилизации солнечной энергии непосредственно в процессе эксплуатации. Гибридные системы электроснабжения, объединяющие фотоэлектрические батареи с электрохимическими накопителями энергии, позволяют обеспечить непрерывное энергоснабжение тяговых электроприводов при переменных условиях освещенности и динамически изменяющейся нагрузке, характерной для реальных режимов движения транспортных средств [2].

Ключевой проблемой эффективной эксплуатации фотоэлектрических систем является необходимость постоянного отслеживания точки максимальной мощности на вольт-амперной характеристике солнечных

модулей, изменяющейся в зависимости от интенсивности солнечного излучения, температуры элементов и параметров нагрузки. Реализация адаптивных алгоритмов управления понижающими преобразователями постоянного напряжения позволяет максимизировать извлечение энергии из фотоэлектрических источников при одновременном обеспечении требуемых характеристик питания тягового электропривода и оптимального режима заряда аккумуляторной батареи .

В работе выполнено имитационное моделирование комбинированного электропривода электромобиля, включающего фотоэлектрическую батарею (ФЭБ), тяговую аккумуляторную батарею (ФЭБ) и тяговый преобразователь через каскад понижающих преобразователей. Особое внимание уделяется реализации алгоритма отслеживания точки максимальной мощности [3].

В качестве объекта исследования выбран гольф-кар, характеризующийся небольшой полной массой, благоприятным соотношением площади крыши к требуемой мощности силовой установки и преимущественной эксплуатацией в условиях хорошей погоды, что обеспечивает максимальную эффективность преобразования солнечной энергии.

Материалы и методы

Объектом исследования выступает гибридная система электроснабжения малогабаритного электромобиля класса гольф-кар, предназначенного для перевозки 2-4 пассажиров на территориях гольф-клубов, курортных комплексов и закрытых территорий [4]. Транспортное средство характеризуется полной массой 400-500 кг, максимальной скоростью движения 30-40 км/ч и номинальной мощностью тягового электропривода в диапазоне 2-3 кВт. Площадь крыши транспортного средства, доступная для размещения фотоэлектрических модулей, принята равной 2 м^2, что при стандартной интенсивности солнечного излучения обеспечивает генерацию мощности до 2 кВт, достаточной для частичного или полного покрытия энергопотребления привода при движении с ограниченной 40 км/ч скоростью [5, 6].

Структурная схема комбинированного электропривода электромобиля реализована в среде имитационного моделирования MATLAB/Simulink и представлена на рисунке 1. Система включает ФЭБ, два каскадно соединенных понижающих преобразователя постоянного напряжения buck converter, ТАБ и нагрузку в виде тягового преобразователя. Принцип работы системы базируется на управлении энергетическими потоками между ФЭБ, ТАБ и тяговым электроприводом для обеспечения максимальной эффективности использования солнечной энергии при переменных условиях освещенности и нагрузки [7].

ФЭБ является первичным источником энергии, генерирующим постоянные напряжение и ток, величина которых зависит от интенсивности солнечного излучения и температуры фотоэлектрических элементов. Измеренное значение мощности батареи используется алгоритмом отслеживания точки максимальной мощности для формирования оптимального управляющего сигнала [8]. Преобразователь Buck converter 1 имитирует работу импульсного регулятора напряжения, согласующего выходное напряжение ФЭБ и напряжение ТАБ.

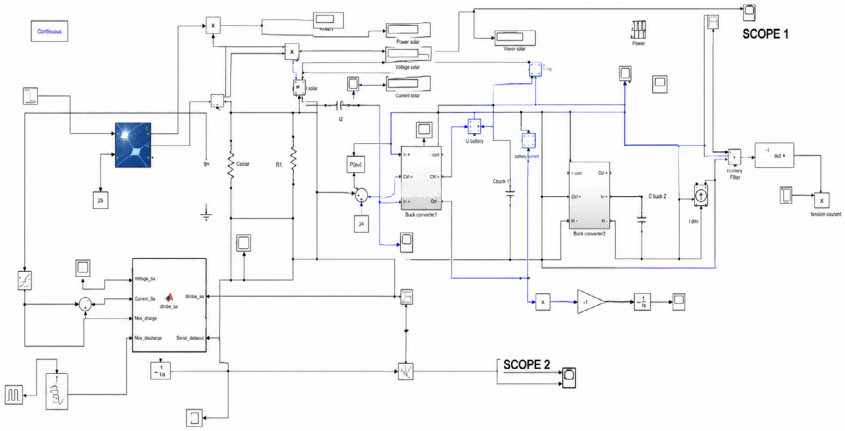


Рисунок 1 – Структурная схема

ТАБ (блок Battery) расположена параллельно выходу первого понижающего преобразователя и входу второго преобразователя. ТАБ функционирует в двунаправленном режиме, обеспечивая накопление избыточной энергии при превышении генерации фотоэлектрической батареи над потреблением нагрузки и отдачу накопленной энергии в периоды недостаточной солнечной генерации.

Тяговый электропривод моделируется источником тока Electric Drive current, моделирующим потребление энергии тяговым преобразователем. Величина потребляемого тока рассчитывается по заданному кусочно-линейной функцией приближению зависимости потребляемой при движении в городском цикле мощности от времени.

Механическая нагрузка на валу электродвигателя определяется моментом сопротивления движению, включающим аэродинамическое сопротивление, сопротивление качению и момент инерции транспортного средства при ускорении.

Структура преобразователя напряжения Buck converter 1 представлена на рисунке 2. Система управления преобразователем интегрирует измерительные блоки напряжения U solar2 и тока I conv, формирующие сигналы обратной связи для алгоритма отслеживания точки максимальной мощности. Мгновенная мощность ФЭБ вычисляется умножителем m1, на входы которого поступают измеренные значения напряжения и тока. Результат вычисления мощности используется алгоритмическим блоком, реализующим метод возмущения и наблюдения с адаптивным размером шага для определения оптимального коэффициента заполнения k широтно-импульсной модуляции. Блок формирования управляющего сигнала с обозначением m и k преобразует цифровой сигнал коэффициента заполнения в последовательность импульсов с соответствующей относительной длительностью проводящего состояния силового ключа [9].

Структура второго преобразователя Buck converter 2 аналогична первому преобразователю, однако система управления использует пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор для стабилизации напряжения питания тягового преобразователя независимо от уровня напряжения аккумуляторной батареи и его колебаний, вызванных изменением величины отдаваемого тока.

Алгоритм отслеживания точки максимальной мощности реализован в виде функции на языке программирования MATLAB:

```
function delta_k  = fcn(dpower_dt, pulse, old_delta_k, old_pulse)
min_delta_k = 0.02; % Наименьшее значение k
max_delta_k = 5; % Наибольшее значение k
k_p = 0.1;
if old_delta_k == 0
    old_delta_k = min_delta_k;
end
if (pulse > 0 && old_pulse == 0)
    if abs(dpower_dt) > 0.1 % Условие максимума dP/dt = 0
        if dpower_dt > 0 % Выбор знака изменения мощности
            new_delta_k = old_delta_k * 1.1; % Быстрое увеличение k
        else
            new_delta_k = -1 * sign(old_delta_k) * min_delta_k;
        end
    else
        new_delta_k = old_delta_k * 1.1; % Быстрое увеличение k
    end
     if abs(new_delta_k) > max_delta_k % Проверка выходной величины
коэффициента k по ограничениям
        new_delta_k = sign(new_delta_k) * max_delta_k;
    end
    delta_k = new_delta_k;
else
    delta_k = old_delta_k;
end
```

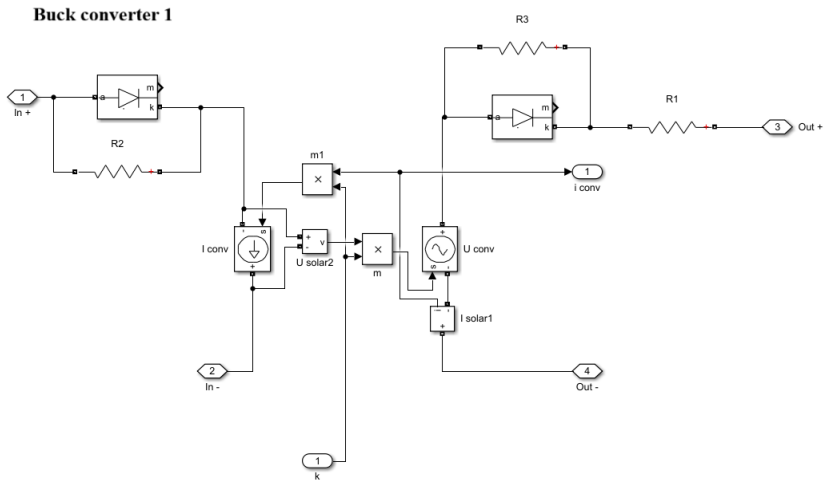


Рисунок 2 – Схема модели преобразователя напряжения

Особенностью алгоритма является использование экспоненциального закона изменения выходного значения, что обеспечивает высокое быстродействие регулятора в условиях резких изменений освещенности.

При моделировании системы использована модель фотоэлектрической батареи, включающая 5 параллельных групп элементов и 2 последовательно соединенных модуля в каждой группе, что обеспечивает требуемые значения выходного напряжения и тока. Каждый фотоэлектрический модуль имеет номинальную мощность 213.15 Вт при интенсивности излучения 1000 Вт/м² и температуре элементов 25°С. Количество фотоэлектрических ячеек в одном модуле составляет 60 шт.

Результаты и обсуждение

На рисунке 3 показана зависимость мощности, вырабатываемой батареей исследуемого электромобиля, от времени. Зависимость получена при помощи блока Scope1 на имитационной модели.

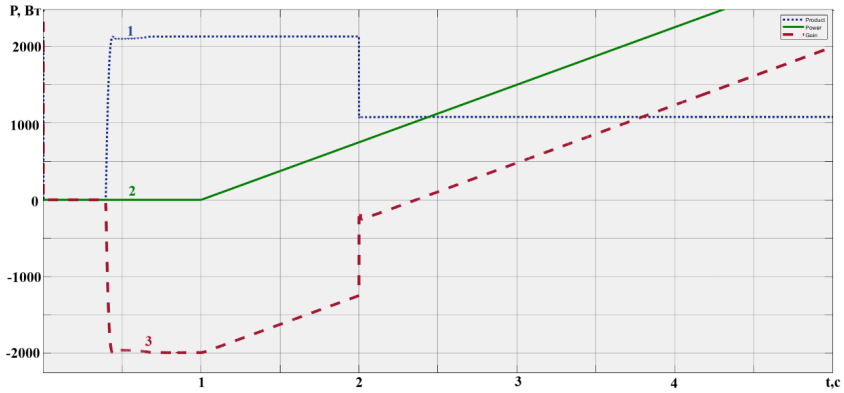


Рисунок 3 – Зависимость мощности составных частей электропривода от времени:
1 – мощность фотоэлектрической батареи,
2 – мощность разряда аккумулятора,
3 – мощность, потребляемая тяговым приводом.

Представленная зависимость показывает, что регулятор способен поддерживать постоянную мощность независимо от режима работы тягового электропривода. Регулятор устойчиво работает в условиях резкого изменения освещенности, которое имитируется в момент t=2 с. В момент t=2,4 с мощность, потребляемая электроприводом, превышает мощность фотоэлектрической батареи, и аккумулятор переходит из режима заряда в режим разряда.

График изменения коэффициента, представленный на рисунке 4, демонстрирует динамику изменения коэффициента заполнения широтно-импульсной модуляции, формируемого алгоритмом отслеживания точки максимальной мощности в процессе поиска оптимального режима работы фотоэлектрических модулей.

В начальный момент времени наблюдается резкое нарастание коэффициента заполнения от минимального значения, что соответствует этапу грубого поиска окрестности точки максимальной мощности с увеличенным шагом возмущения для ускорения переходного процесса [10]. После достижения пикового значения алгоритм идентифицирует превышение оптимального уровня и корректирует коэффициент заполнения в обратном направлении, постепенно снижая его до установившегося значения. В установившемся режиме наблюдаются незначительные колебания коэффициента заполнения относительно оптимального уровня,

обусловленные непрерывной работой алгоритма возмущения и наблюдения, периодически изменяющего управляющий параметр для верификации нахождения в точке максимальной мощности. Амплитуда установившихся осцилляций остается минимальной, что свидетельствует об использовании адаптивного размера шага возмущения, автоматически уменьшающегося при приближении к оптимуму для повышения точности позиционирования рабочей точки. Характер переходного процесса подтверждает эффективность алгоритма управления и быстрое достижение оптимального режима работы системы с минимальными энергетическими потерями на этапе поиска точки максимальной мощности.

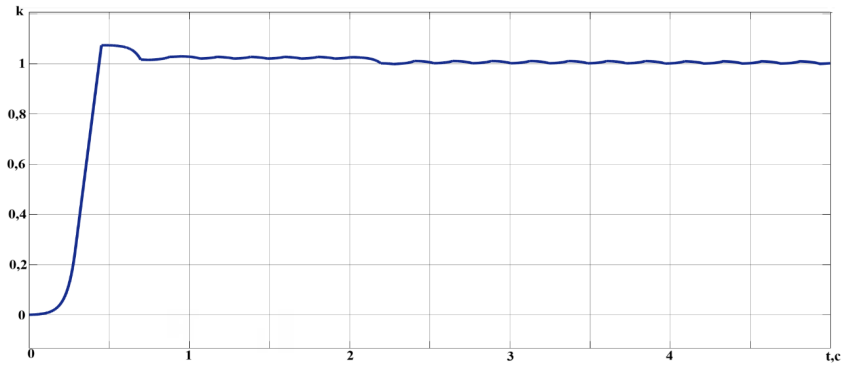


Рисунок 4 – График изменения коэффициента

Выводы

В работе реализована в среде имитационного моделирования MATLAB/Simulink структурная схема гибридной системы электроснабжения электромобильной платформы, интегрирующая фотоэлектрическую батарею мощностью 2 кВт, тяговую аккумуляторную батарею и электропривод.

Реализован оптимальный алгоритм отслеживания точки максимальной мощности на основе метода возмущения и наблюдения с переменным размером шага. Алгоритм продемонстрировал эффективность поиска оптимального режима работы фотоэлектрических модулей. Анализ переходных процессов показал быстрое (0,5с) достижение точки максимальной мощности с минимальными (около 1 %) колебаниями в установившемся режиме.

Система управления вторым понижающим преобразователем на базе ПИД-регулятора обеспечивает стабильное напряжение питания тягового

электропривода с минимальной величиной рассогласования между заданным и фактическим значениями.

Аккумуляторная батарея функционирует в качестве буферного накопителя энергии, компенсирующего кратковременные дисбалансы между генерацией фотоэлектрической системы и потреблением нагрузки. Высокая стабильность напряжения аккумулятора на протяжении всего периода моделирования подтверждает корректность энергетического баланса системы и отсутствие критических режимов заряда-разряда электрохимических элементов.

Результаты моделирования показывают, что в солнечный день при поддержании постоянной мощности фотоэлектрической батареи 1100 Вт она способна обеспечить 55 % потребления электроэнергии на тягу. Разработанная имитационная модель демонстрирует работоспособность предложенной архитектуры гибридной системы электроснабжения и эффективность предложенного алгоритма управления для максимизации использования солнечной энергии. Полученные результаты моделирования подтверждают перспективность интеграции фотоэлектрических преобразователей в системы электропитания транспортных средств для повышения автономности и снижения зависимости от стационарной зарядной инфраструктуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Гибридные системы на базе солнечных панелей: что это и как работает. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://vash.kyiv.ua/ru/hybrydnye-systemy-na-baze-solnechnyh-paneley-chto-eto-y-kak-rabotaet/

2 **Sarvi, M., Azadian, A.** A comprehensive review and classified comparison of MPPT algorithms in PV systems // Energy Systems. – 2022. – Vol. 13. – Iss. 2. – P. 281 – 320. – https://doi.org/10.1007/s12667-021-00427-x.

3 **Yang, B., Zhu, T., Wang, J., S., Hongchun, Y. T., Zhang, X., Yao, W., Sun, L.** Comprehensive overview of maximum power point tracking algorithms of PV systems under partial shading condition // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 268. – Art. no. 121983. – https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121983.

4 **Yan, Q., Zhang, B., Kezunovic, M.** Optimized operational cost reduction for an EV charging station integrated with battery energy storage and PV generation // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2019. – Vol. 10. – Iss. 2. – Art. no. 8242670. – P. 2096 – 2106. – https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2788440.

5 Электрические гольф-кары [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://dragon-era.com/ru/electric-golf-carts/.

6 Влияние бортовых солнечных панелей на характеристики тягового аккумулятора электромобиля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energos/2024/energstart/pages/Articles/408.pdf.

7 Аккумулятор электромобиля – Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Аккумулятор_электромобиля.

8 **Jeong, H., Lee, H., Liu, Yu-Chen, Kim, K. A.** Review of Differential Power Processing Converter Techniques for Photovoltaic Applications // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2019. – Vol. 34. – Iss. 1. – Art. no. 8516313. – P. 351 – 360. – https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2876176

9 Понижающий преобразователь (buck converter) – расчет компонентов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://electricalschool.info/electronica/2085-ponizhayuschiy-preobrazovatel-buck-converter-raschet-komponentov.html.

10 Слежение за точкой максимальной мощности солнечной батареи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/slezhenie-za-tochkoy-maksimalnoy-moschnosti-solnechnoy-batarei.

REFERENCES

1 Gibridnyye sistemy na baze solnechnykh paneley: chto eto i kak rabotayet [Hybrid solar systems: what they are and how they work] [Electronic resource]. – Access mode: https://vash.kyiv.ua/ru/hybrydnye-systemy-na-baze-solnechnyh-paneley-chto-eto-y-kak-rabotaet/.

2 **Sarvi, M., Azadian, A.** A comprehensive review and classified comparison of MPPT algorithms in PV systems // Energy Systems. – 2022. – Vol. 13. – Iss. 2. – P. 281 – 320. – https://doi.org/10.1007/s12667-021-00427-x.

Yang, B., Zhu, T., Wang, J., S., Hongchun, Y. T., Zhang, X., Yao, W., Sun, L. Comprehensive overview of maximum power point tracking algorithms of PV systems under partial shading condition // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 268. – Art. no. 121983. – https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121983.

3 **Yan, Q., Zhang, B., Kezunovic, M.** Optimized operational cost reduction for an EV charging station integrated with battery energy storage and PV generation // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2019. – Vol. 10. – Iss. 2. – Art. no. 8242670. – P. 2096 – 2106. – https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2788440.

4 Электрические гольф-кары [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://dragon-era.com/ru/electric-golf-carts/.

5 Влияние бортовых солнечных панелей на характеристики тягового аккумулятора электромобиля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energos/2024/energstart/pages/Articles/408.pdf.

6 Аккумулятор электромобиля – Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Аккумулятор_электромобиля.

7 **Jeong, H., Lee, H., Liu, Yu-Chen, Kim, K. A.** Review of Differential Power Processing Converter Techniques for Photovoltaic Applications // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2019. – Vol. 34. – Iss. 1. – Art. no. 8516313. – P. 351 – 360. – https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2876176.

8 Ponizhayushchiy preobrazovatel' (buck converter) – raschet komponentov [Buck Converter - Component Calculation] [Electronic resource]. – Access mode: https://electricalschool.info/electronica/2085-ponizhayuschiy-preobrazovatel-buck-converter-raschet-komponentov.html.

9 Slezheniye za tochkoy maksimal'noy moshchnosti solnechnoy batarei [Solar panel maximum power point tracking] [Electronic resource]. – Access mode: https://cyberleninka.ru/article/n/slezhenie-za-tochkoy-maksimalnoy-moschnosti-solnechnoy-batarei.

Поступило в редакцию 29.04.26.
Поступило с исправлениями 05.05.26.
Принято в печать 31.08.26.

**М. А. Добренко[1], Д. Р. Корамбаев[2], И. А. Хажин[3], М. В. Ярославцев[4], М. Т. Азаматов[5]*
[1,2,3,4,5]Торайғыров университет,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
29.04.26 ж. баспаға түсті.
05.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ФОТОЭЛЕКТРЛІК ТҮРЛЕНДІРГІШПЕН ҚОРЕКТЕНЕТІН ЭЛЕКТРОМОБИЛЬДІҢ ҚУАТ КӨЗДЕРІН БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІН СИНТЕЗДЕУ

Мақалада фотоэлектрлік түрлендіргіштерді электрохимиялық энергия сақтағыштармен біріктіретін электромобиль платформасының гибридті электрмен жабдықтау жүйесін әзірлеу және имитациялық модельдеу қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі

электромобильдердің автономдылығын арттыру және көлікті пайдалану барысында тікелей жаңартылатын энергия көздерін пайдалану арқылы стационарлық зарядтау инфрақұрылымына тәуелділікті азайту қажеттілігімен айқындалады.

MATLAB/Simulink ортасында жүзеге асырылған жүйенің функционалдық сұлбасы ұсынылады, онда жалпы қуаты екі киловаттан асатын фотоэлектрлік батарея, тартымдық аккумуляторлық батарея және тұрақты тоқ электржетегі екі каскадты қосылған кернейтін тұрақты кернеу түрлендіргіштері арқылы қосылған. Жарықтандыру жағдайларының өзгеруі кезінде жылдам конвергенцияны және фотоэлектрлік модульдердің жұмыс нүктесін жоғары дәлдікпен орналастыруды қамтамасыз ететін айнымалы қадам өлшемімен бұзу және бақылау әдісіне негізделген максималды қуат нүктесін бақылаудың адаптивті алгоритмін әзірлеуге ерекше назар аударылады.

Имитациялық модельдеу нәтижелері ұсынылған жүйе архитектурасының тиімділігін және энергия ағындарын басқару алгоритмдерінің дұрыс жұмысын растайды. Өтпелі процестерді талдау күн панельдерінің максималды қуат нүктесіне жылдам жетуді, аккумуляторлық батарея кернеуінің тұрақтылығын және тартымдық электржетегінің үдеуінің біркелкі сипатын көрсетеді. Әзірленген жүйе жаңартылатын энергия көздері негізінде электромобильдерді автономды электрмен жабдықтау технологияларын енгізу үшін негіз жасайды және экологиялық таза көліктің дамуына ықпал етеді.

Кілтті сөздер: гибридті электрмен жабдықтау жүйесі, электромобиль, фотоэлектрлік батарея, оңтайлы басқару жүйесі, имитациялық модельдеу, жаңартылатын энергия көздері.

**M. A. Dobrenko[1], D. R. Korambaev[2], I. A. Khazhin[3], M. V. Yaroslavtsev[4], M. T. Azamatov[5]*
[1,2,3,4,5]Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 29.04.26.
Received in revised form 05.05.26.
Accepted for publication 31.08.26.

SYNTHESIS OF A POWER MANAGEMENT SYSTEM FOR ENERGY SOURCES OF AN ELECTRIC VEHICLE POWERED BY A PHOTOVOLTAIC CONVERTER

This article presents the development and simulation modeling of a hybrid power supply system for an electric vehicle platform integrating photovoltaic converters with electrochemical energy storage devices. The relevance of the study is driven by the need to increase the autonomy of electric vehicles and reduce their dependence on stationary charging infrastructure through the utilization of renewable energy sources directly during vehicle operation.

A functional diagram of the system implemented in the MATLAB/Simulink environment is presented, comprising a photovoltaic battery with a total power output exceeding two kilowatts, a traction battery, and a DC electric drive connected through two cascaded step-down DC-DC converters. Special attention is given to the development of an adaptive maximum power point tracking algorithm based on the perturb-and-observe method with variable step size, ensuring fast convergence under changing irradiance conditions and high positioning accuracy of the operating point of the photovoltaic modules.

The simulation results confirm the effectiveness of the proposed system architecture and the correct operation of the energy flow control algorithms. Analysis of transient processes demonstrates rapid attainment of the maximum power point of the solar panels, stable battery voltage, and smooth acceleration of the traction electric drive. The developed system provides a foundation for the implementation of autonomous power supply technologies for electric vehicles based on renewable energy sources and contributes to the development of environmentally clean transportation.

Keywords: hybrid power supply system, electric vehicle, photovoltaic battery, optimal control system, simulation modeling, renewable energy sources.

МРНТИ 44.31.35
https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/268-279

Б. А. Жакишев[1], У. Ш. Кокаев[2], С. К. Жумажанов[3], *Е. О. Килибаев[4], Н. А. Баимбетов[5]
[1,2,3,4,5]Евразийский национальный
университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-4642-6818
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3636-8435
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0400-5488
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1847-4824
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0990-8731
*e-mail: 1k.e.o_77@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ТАЯНИЯ СНЕГА В СНЕГОПЛАВИЛЬНОЙ МАШИНЕ ПРИ ПРЯМОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЛАМЕНИ

В данной статье проведены аналитические и экспериментальные исследования касательно климатических особенностей зимнего периода города Астана, существующей технологии уборки снега, которая пагубна в весенний период, подтоплением прилегающих к городу населенных пунктов, а также изучен многолетний опыт города Москвы по данной проблеме. Рассмотрена наиболее близкая по техническому решению поставленной задачи снегоплавильная установка канадской фирмы TRECAN (ТРИКАН), которая является одним из мировых лидеров в этой области и которая широко применяются в Северной Америке. Предложен прямой метод воздействия пламени на расплавляемый снег, исследованы имеющие в открытом доступе отечественные разработки и интегрированы в текущий материал. По результатам сравнений по шкале окраса температур определено значение температуры струи пламени от горения жидких горюче-смазочных отходов, которая составила 1300 °С. Произведен расчет потерь тепловой энергии при расплавлении снежной массы воздействием через перегораживающий слой. На основании полученных результатов, обосновано применение открытого воздействия пламени в процессе плавления снега, выделяемая энергия которой полностью тратится на интенсификацию процесса таяния. Учитывая все особенности процесса плавления и теоретических расчетов разработана, предварительная конструкция плавильной камеры в виде перевернутой пирамиды.

Ключевые слова: снегоплавильная установка, источник тепла, камера сжигания, цвет каления, топочное устройство.

Введение

Климат Северного и Центрального Казахстана относится к резко континентальному, с холодной зимой и жарким летом. Зима характеризуется сильными морозами, метелями и буранами, по продолжительности составляет около 6 месяцев, со средней январской температурой около – 22 °С, не редко может опуститься и до – 45 °С. В частности, в январе 2024 года количество выпавшего снега в Астане превысило месячную норму, составив 23 миллиметра против 18 миллиметров, установленных для этого месяца. Напротив, в декабре того же года, несмотря на снегопады, выпало 12 миллиметров осадков при норме 25 миллиметров. Однако, снежные метели, какой бы количество выпавшего осадка ни была, заваливают участки магистральных дорог, а в городских условиях улицы и дворы, создавая заторы и связанные с этим неудобства горожанам, при передвижениях. Удаление снега традиционно выполняется городскими коммунальными службами несколькими операциями: первая – сбор и окучивание снега с проезжей части дорог, пешеходных тротуаров, автомобильных стоянок, зон отдыха, дворов и прочее; вторая – погрузка в передвижную самосвальную спецтехнику; третья – вывоз в специально отведенные для их складирования снеговалы [1]. Следует отметить, что из-за отсутствия других технологичных способов борьбы со стихией, хотя существуют много примеров зарубежного опыта, городские коммунальные службы по-прежнему прибегают механизированному вывозу снега и очищения от снежных завалов. Такой способ влечет за собой негативные паводковые последствия в весенний период, близ прилегающих к городу населенных пунктах, которые плотно сосредоточены по всему периметру.

Для примера, в работе [2] описывается многолетний опыт работы по утилизации снега в городе Москва хронология которой начинается с 1925 года, а 6 марта 1928 году стало обязательным уборка снега постановлением Президиума Московского Совета «Об устройстве и содержании снеготаялок в г. Москве», в котором предписывалось:

– «разрешения на поставку и пользование постоянными и передвижными снеготаялками выдаются отделом благоустройства Московского Коммунального Хозяйства;

– снеготаялки как постоянные, так и передвижные, ставятся внутри владения, со спуском талой воды в городскую водосточную сеть. Постановка снеготаялок на проездах и площадях допускается не иначе, как с особого на то разрешения Московского Коммунального Хозяйства, выдаваемого по соглашению с Административным отделом МГИК. Спуск воды из снеготаялок в Канализационную сеть воспрещается» [2].

Объект исследования – снежные массы. Предметом исследования выступает камера плавления, где сжигаются отработанные жидкие горюче-смазочные отходы и обеспечивается прямое воздействие пламени на снежную массу.

Цель исследования – обеспечение интенсивного таяния снега в плавильной камере машины за счет прямого воздействия пламени на снежные массы, разработка конструкций плавильной камеры, предусматривающая максимальную генерацию тепловой энергии и прямой контакт воздействия, при соблюдении нормативных требований по вредным выбросам в окружающую среду.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– анализ существующих способов плавления снега прямым воздействием пламени на снежные массы из существующих источников технической литературы;

– трансфер топочных устройств для сжигания жидких горюче-смазочных отходов и его приспособление в технологический процесс работы снеготаялки;

– разработка конструкции снеготаялки;

– определение температурных значений напрямую воздействующего пламени на растапливаемые снежные массы.

Материалы и методы. Методологическую и теоретическую основу работы составили труды зарубежных и казахстанских ученых в области сжигания жидких углеводородов в горелочных устройствах с подачей перегретого водяного пара [3-7]. Наиболее близким по техническому решению поставленной задачи являются снеготаялки установки канадской фирмы TRECAN (ТРИКАН), которая является одним из мировых лидеров в этой области и которые широко применяются в Северной Америке, особенно в аэропортах и крупных городах, имеющие как стационарные, так и мобильные модификации. Они обладают высокой производительностью от 20 до 500 тон снега в час или от 60 до 1500 м^3/ч. Такая эффективность

снеготаялки процесса обеспечивается в первую очередь особенной конструкцией – пружинных горелок, которые работают на газовом или жидком топливе (нефть, авиационное топливо, дизельное топливо) и в непосредственном контакте с переплавляемым снегом. Применение данного принципа плавления снега, позволяет достичь максимально возможного КПД (до 98 %). Вместительный бункер для снега имеет термическую изоляцию (рисунок 1), что уменьшает потери тепла при работе снеготаялки установки. Особый интерес вызывает модификация МХ называемая установкой со «снежным стартом», которая позволяет снеготаялки установке работать без предварительного заполнения бункера водой за счет специальной формы горелок. [8].

Рисунок 1 – Снеготаялка установка TRECAN

Результаты и обсуждение. Технической задачей является анализ существующих топочных устройств, работающих на жидких горюче-смазочных отходах. В источнике [9] демонстрируется горелочное устройство (рисунок 2), в котором утилизируется отработанное масло, при этом конструкция обеспечивает в процессе сжигания полное сгорание топлива, без видимых выделении в атмосферу загрязняющих летучих веществ сажи, копоти и т.п.

В данном устройстве розжиг осуществляется следующим образом: предварительно в воронку 3 заливается отработанное масло, оно по трубке стекается на дно грелочного устройства 1. Крышка горелочного устройства 4 отворачивается и в горловину закладывается ветошь, предварительно

пропитанная легко-воспламеняющей жидкостью (бензином, спиртом), которую следует поджечь. Следующим шагом включается кнопочным ручным управлением 5 вентилятор 2 для интенсивной подачи воздуха в камеру сгорания горелочного устройства.

В камере сгорания горелочного устройства происходит частичное возгорание отработанного масла с одновременным испарением летучих парогазовых смесей, а нагнетание воздуха обеспечивает полное сгорание всех компонентов. Принимая во внимание все условия, предусматривающие прямой контакт пламени со снегом, предлагается конструкция узла снегоплавильной установки (рис. 3).

В приемный бункер 1 выполненный в виде перевернутой пирамиды, загружается снег 2, ковшом спецтехники или вручную лопатой. Приемный бункер одновременно является камерой плавления снега, где в нижней части по четырем сторонам, смонтированы горелочные устройства 4, в которых сжигаются жидкие горюче-смазочные отходы 6, имеющую две ступени горения. В первой ступени происходит горение самой жидкой горюче-смазочной массы с выделением летучих газовоздушных смесей [4,5].

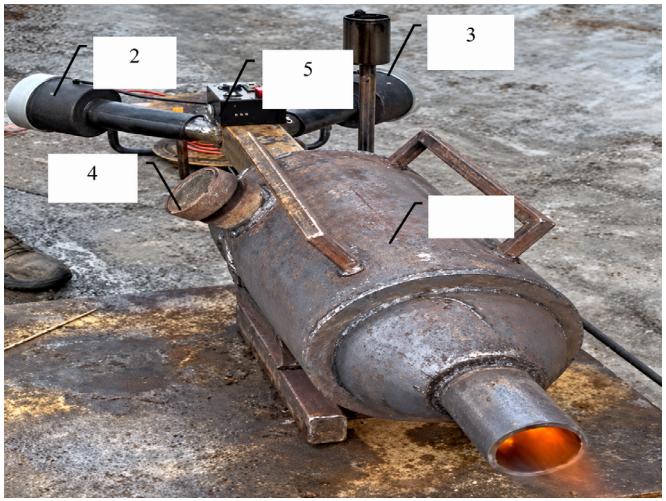


Рисунок 2 – Горелка

Продукты горения и недожога поднимаясь по каналу горелочного устройства при высокой температуре смешиваются нагнетаемым вентилятором 3 воздухом воспламеняются и вырываются через горловину горелки в камеру плавления снега, при этом струя пламени 5 напрямую

контактирует со снегом. На рисунке 4 показан фотоснимок горелочного устройства в действии, где отчетливо показан цвет пламени, который позволяет сопоставить его цвет с температурой по окрасу.

В работе [4], а также [5] авторами предлагается снегоплавильная машина, где между расплавляемым снегом и источником тепла, имеется перегородка из стального волнистого листа, через толщу которой проходимое тепло Qт теряется на нагрев металла. Количественно оно определяется из формулы закона Ж. Б. Фурье для плоской стенки:

$$Q_T = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{\delta} S \qquad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности обычной стали она составляет в пределах 50 ÷ 90 Вт/м·К [10], T_2 и T_1 – температура внутренней 1300 °С и внешней 900 °С поверхности перегородки камеры источника тепла и бункера для плавления снега (900 °С установлено на поверхности стального топочного устройства по сопоставлению окраса по температурной шкале в литературном источнике [5], 1300 °С определено соответственно в данном материале), δ – толщина слоя перегородки, S – площадь поперечного сечения стенки перегородки.

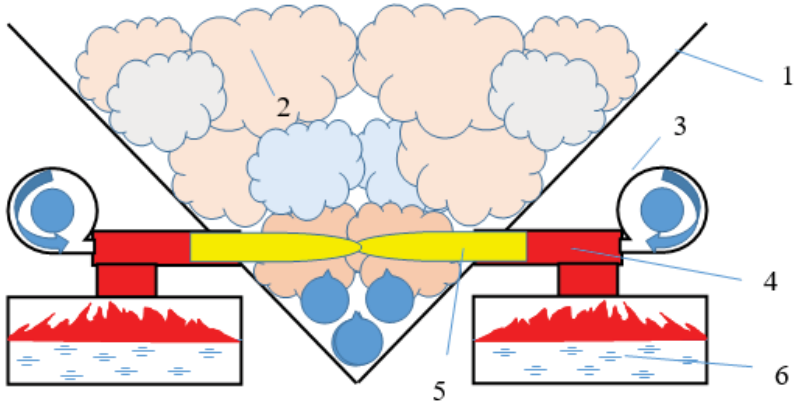


Рисунок 3 – Конструкция камеры плавления снега прямым воздействием пламени

Для единообразия единиц измерения, из расчета 1 К = -273 °С, в таком случае T_2 = 1027 К, T_1 = 627 К. Толщину перегородки условно возьмем

δ = 0,5 см, если перевести в метры получим 0,0005м. Площадь поперечного сечения перегородки для упрощения подсчетов условно возьмем S = 1 м^2. Подставив значения получим:

$$Q_T = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{\delta} S = -50 Вт/м \cdot К \frac{1027К - 627К}{5 \cdot 10^{-4} м} 1м^2 \approx 40 \cdot МВт/м^2$$

Итого теряемая в секунду на квадратный метр поверхности перегородки энергия в Джоулях составило 40 МДж/(с·м^2) [11].

В предлагаемом варианте конструкции снегоплавильной машины исключаются возможные потери на нагрев перегораживающего слоя, тем самым она затрачивается на плавление снежной массы, что приводит к интенсификации процесса таяния снега, которая достигается путем прямого воздействия струи пламени. Температура пламени определена сопоставлением визуального совпадения с приведенной температурной шкалой, которая составила максимальное значение $T_м$ = 1300 °С.

Температура, °С	Цвет каления	Цвет
550	тёмно-коричневый	
630	коричнево-красный	
680	тёмно-красный	
740	тёмно-вишневый	
770	вишнёвый	
800	ярко- или светло-вишнёвый	
850	ярко- или светло-красный	
900	ярко-красный	
950	оранжевый	
1000	жёлтый	
1100	ярко- или светло-жёлтый	
1200	жёлто-белый	
1300	белый	

Рисунок 4 – Горелка в действии

Выводы

Теоретические расчеты показали правильность выбранного решения и показало, что в представленных предыдущих материалах не учитывались потери тепловой энергии, которая затрачивалась на нагревание перегородочного слоя. Из приведенных выше экспериментальных и аналитических исследований можно утверждать, что при плавлении снежной массы прямым воздействием пламени предлагаемым способом, обеспечивается максимальная температура, по цвету окраса которой «белая». Установлено значение температуры по цвету каления в эпицентре пламени,

которая составила 1300 °С. Нагнетаемый вентилятором воздух в камеру сгорания горелочного устройства, способствует возникновению напора горячей струи вырываемого пламени, которая напрямую воздействует на снежную массу, что способствует интенсивному плавлению. Такой технологический процесс позволяет выполнять работу снегоплавильной установки со «снежным стартом». Учитывая особенности процесса плавления снега в условиях прямого воздействия, пламени разработана оптимальная конструкция снегоплавильной машины в виде перевернутой пирамиды. Топливом для источника тепла исследовались жидкие горюче-смазочные отходы, в процессе сжигания которых не наблюдалось видимых выделении в окружающую среду вредных и токсичных веществ. В качестве горелочного устройства рассматривалась конструкция, разработанная отечественными разработчиками, материалы которых были в открытом доступе, экспериментальный запуск и работа в действии которой по наблюдениям демонстрировало динамичный характер.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Жакишев, Б. А., Атякшева, А. В., Жумагулов, М. Г., Имамбаев, Н. С., Айтмагамбетова, М. Б., Сакипов, К. Е.** // Расчет производительности и разработка снегоплавильной машины для климатических условий Казахстана // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. №3 (73). – Алматы. – 2019. – С. 105–110.

2 **Лагунов, А. Я.** Снеготаялки и московский опыт их эксплуатации [Электронный ресурс]. – URL: https://www.dkt.ru/images/stati/snegotayalki.pdf

3 **Ануфриев, И. С.** Экспериментальное исследование процессов при сжигании жидких углеводородов в горелочных устройствах с подачей перегретого водяного пара // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Новосибирск, 2019. – 248 с.

4 **Жакишев, Б. А., Конысбекова, Г. К., Тайбасаров, Ж. К., Сакипов, К. Е., Атякшева, А. В., Айтмагамбетова, М. Б.** Снегоплавильная машина. Патент №4024 от 31.05.2019г. на полезную модель Республики Казахстан.

5 **Жакишев, Б. А., Килибаев, Е. О., Алиева, А. К., Бияхметова, А. К., Рахымбаева, С. Е.** // Использование жидких углеродистых отходов для сжигания в топках-утилизаторах // Вестник КазНИТУ. – 2021. – № 2 (143). – С. 279–284. – https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i2.36.

6 **Cristescu, Corneliu, Dumitrescu, Liliana, Lepădatu, Ioan, Sauciuc, Radu.** Mobile and stationary equipment for melting snow from the urban

public space. // Proceedings of the 2017 International Conference on Hydraulics and Pneumatics — HERVEX, Băile Govora, Romania, November 8–10, 2017. – P. 181–187. [Electronic resource]. – URL: https://ihp.ro/metz/Articol_HERVEX2017_pp.181-187.pdf?utm_source=chatgpt.com

7 **Khodadad, Mina, Sanei, Mohsen, Rizzo, Agatino, Ma, Jing.** Urban snow and ice removal and storage: A systematic literature review // City and Environment Interactions. – 2025. – Vol. 27. – Art. 100213. – https://doi.org/10.1016/j.cacint.2025.100213

8 Special-machine.ru. Продукция компании [Электронный ресурс]. – URL: http://special-machine.ru/products_company.html

9 Facebook. Видеозапись Reel [Электронный ресурс]. – URL: https://www.facebook.com/reel/1950187542052025

10 СП РК 2.04-107-2022. Тепловая защита зданий [Электронный ресурс]. – URL: https://prg.kz/document/?doc_id=39838250&pos=6;246

11 TranslatorsCafe.com. Конвертер плотности теплового потока [Электронный ресурс]. – URL:https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/heat-flux-density/1-5/watt/meter%C2%B2-joule/second/meter%C2%B2/

REFERENCES

1 **Zhakishev, B. A., Atyaksheva, A. V., Zhumagulov, M. G., Imambaev, N. S., Aitmagambetova, M. B., Sakipov, K. E.** Raschet proizvoditel'nosti i razrabotka snegoplavil'noy mashiny dlya klimaticheskikh usloviy Kazakhstana [Calculation of productivity and development of a snow-melting machine for the climatic conditions of Kazakhstan] [Text] – Almaty: Vestnik Natsional'noy inzhenernoy akademii Respubliki Kazakhstan. – 2019. – № 3 (73). – P. 105–110.

2 **Lagunov, A. Ya.** Snegotayalki i moskovskij opy`t ix e`kspluatacii [Snow-melting systems and the Moscow experience of their operation] [Electronic resource]. – https://www.dkt.ru/images/stati/snegotayalki.pdf

3 **Anufriev, I. S.** Eksperimental'noe issledovanie protsessov pri szhiganii zhidkikh uglevodorodov v gorelochnykh ustroystvakh s podachey peregretogo vodyanogo para: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Experimental study of processes during combustion of liquid hydrocarbons in burner devices with the supply of superheated water vapor: dissertation for the degree of doctor of technical sciences] [Text]. – Novosibirsk, 2019. – 248 p.

4 **Zhakishev, B. A., Konysbekova, G. K., Taybasarov, Zh. K., Sakipov, K. E., Atyaksheva, A. V., Aitmagambetova, M. B.** Snegoplavil'naya mashina [Snow melting machine] [Text] – Patent № 4024 ot 31.05.2019 g. na poleznuyu model' Respubliki Kazakhstan.

5 **Zhakishev, B. A., Kilibaev, E. O., Alieva, A. K., Biyakhmetova, A. K., Rakhymbaeva, S. E.** Ispol'zovanie zhidkikh uglerodistykh otkhodov dlya szhiganiya v topkakh-utilizatorakh [Use of liquid carbonaceous waste for combustion in waste-heat furnaces] [Text] // Vestnik KazNITU. – 2021. – № 2 (143). – P. 279–284. – https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i2.36.

6 **Cristescu, Corneliu, Dumitrescu, Liliana, Lepădatu, Ioan, Sauciuc, Radu.** Mobile and stationary equipment for melting snow from the urban public space// Proceedings of the 2017 International Conference on Hydraulics and Pneumatics — HERVEX, Băile Govora, Romania, November 8–10, 2017. – P. 181–187. [Electronic resource] – URL: https://ihp.ro/metz/Articol_HERVEX2017_pp.181-187.pdf?utm_source=chatgpt.com

7 **Khodadad, Mina, Sanei, Mohsen, Rizzo, Agatino, Ma, Jing.** Urban snow and ice removal and storage: A systematic literature review // City and Environment Interactions. – 2025. – Vol. 27. – Art. 100213. – https://doi.org/10.1016/j.cacint.2025.100213

8 Special-machine.ru. Produkciya kompanii [The company's products]. [Electronic resource]. – URL: http://special-machine.ru/products_company.html

9 Facebook. Videozapis` Reel [Reel video recording] [Electronic resource]. – URL:https://www.facebook.com/reel/1950187542052025

10 SP RK 2.04-107-2022. Teplovaya zashhita zdanij [Thermal protection of buildings] [Electronic resource]. – URL: https://prg.kz/document/?doc_id=39838250&pos=6;246

11 TranslatorsCafe.com. Konverter plotnosti teplovogo potoka [TranslatorsCafe.com. Heat flux density converter]. [Electronic resource]. – URL: https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/heat-flux-density/1-5/watt/meter%C2%B2-joule/second/meter%C2%B2/

Поступило в редакцию 10.10.25.
Поступило с исправлениями 28.04.26.
Принято в печать 31.08.26.

Б. А. Жакишев[1], У. Ш. Кокаев[2], С. К. Жумажанов[3],
**Е. О. Килибаев[4], Н. А. Баимбетов[5]*
[1,2,3,4,5]Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.
10.10.25 ж. баспаға түсті.
28.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АЛЫННЫҢ ТІКЕЛЕЙ ӘСЕРІНДЕГІ ҚАР ЕРІТКІЗГЕН ҚАР ЕРІУ ПРОЦЕСІНІҢ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

Бұл мақалада Астана қаласының қыс мезгілінің климаттық ерекшеліктеріне, көктемде зиянды қардан тазалаудың қолданыстағы технологиясына, қалаға іргелес елді мекендерді су басуға қатысты талдамалық және сынамалық зерттеулер жүргізілді, сонымен қатар Мәскеу қаласының осы мәселе бойынша көпжылдық тәжірибесі зерделенді. Тапсырманың техникалық шешіміне ең жақын қар еріметін қондырғы осы саладағы әлемдік көшбасшылардың бірі болып табылатын және Солтүстік Америкада кеңінен қолданылатын канадалық TRECAN (TRICAN) компаниясы болып табылады. Жалынның қардың еруіне әсер етуінің тікелей әдісі ұсынылды, қоғамдық игіліктердегі отандық әзірлемелер зерттеліп, қазіргі материалға біріктірілді. Температураның түс шкаласы бойынша, салыстыру нәтижелері бойынша сұйық отын мен жағармай қалдықтарының жануынан шыққан жалын ағынының температурасы 1300 °C деп анықталды. Бөлу қабаты арқылы әсер ету арқылы қар массасын еріту кезіндегі жылу энергиясының шығынын есептеу жүргізілді. Алынған нәтижелер бойынша қарды еріту процесінде ашық отты пайдалану негізделген, оның босатылған энергиясы толығымен балқу процесін интенсификациялауға жұмсалады. Балқыту процесінің барлық ерекшеліктерін және теориялық есептеулерді ескере отырып, инверттелген пирамида түріндегі балқыту камерасының алдын ала жобасы әзірленді.

Кілтті сөздер: қар еріметін қондырғы, жылу көзі, жағу камерасы, жарқырау түсі, жану құрылғысы.

B. A. Zhakishev[1], U. S. Kokayev[2], S. K. Zhumazhanov[3],
**Y. O. Kilibayev[4], N. A. Baimbetov[5]*
[1,2,3,4,5]L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana.
Received 10.10.25.
Received in revised form 28.04.26.
Accepted for publication 31.08.26.

FEATURES OF THE PROCESS OF SNOW MELTING IN A SNOW MELTER UNDER DIRECT INFLUENCE OF FLAME

In this article, analytical and experimental studies were carried out regarding the climatic features of the winter period of the city of Astana, the existing technology of snow removal, which is harmful in the spring, flooding the settlements adjacent to the city, and also studied the long-term experience of the city of Moscow on this problem. The snow melting installation closest to the technical solution of the task is the Canadian company TRECAN (TRICAN), which is one of the world leaders in this field and which is widely used in North America. A direct method for the effect of flame on melting snow is proposed, domestic developments available in the public domain are studied and integrated into the current material. Based on the results of comparisons on the temperature color scale, the temperature of the flame jet from the combustion of liquid fuel and lubricant waste was determined to be 1300 °C. The calculation of thermal energy losses when melting the snow mass by exposure through the partitioning layer was made. Based on the results obtained, the use of open flame in the process of melting snow is justified, the released energy of which is completely spent on intensifying the melting process. Taking into account all the features of the melting process and theoretical calculations, a preliminary design of the melting chamber in the form of an inverted pyramid was developed.

Keywords: snow melting plant, heat source, combustion chamber, glow color, combustion device.

МРНТИ 44.01.81
https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/280-292

А. Б. Жантлесова[1], А. Д. Умурзакова[2], А. Е. Еруланова[3], П. Ш. Мади[4], *А. Г. Калтаев[5]
[1,2,3,4]Казахский государственный
университет имени С. Сейфуллина,
Республика Казахстан, г. Астана;
[5]Торайгыров университет,
Республика Казахстан, г. Павлодар.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3730-0579
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7683-5256
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8429-8507
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5930-8112
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1684-3347
*e-mail: abdulla911@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ МЕТОДОМ ДИАКОПТИКИ

Растущее число потребителей и нестабильный характер генерации возобновляемых источников энергии (ВИЭ) снижают эффективность традиционных методов моделирования крупных энергосистем. Метод диакоптики, основанный на декомпозиции системы на подсистемы, позволяет сократить объем вычислений, однако классические реализации требуют последовательного (итеративного) наращивания схемы, что приводит к высоким вычислительным затратам при масштабировании.

В данной статье предлагается модификация метода диакоптики для расчета обобщенных параметров (Z-матриц) энергосистем. В отличие от классического подхода, основанного на последовательном наращивании схемы (например, классический метод Крона), предложенный метод учитывает топологию всей сети одновременно.

Исследование базируется на теории графов (построение матриц инциденций и матриц токораспределения) и матричном анализе. Декомпозиция сложной системы на взаимодействующие подсистемы с различными характеристиками генерации и нагрузки позволяет независимо вычислять обобщенные параметры для каждой подсистемы с последующей интеграцией в общее решение, что сокращает объем вычислений и упрощает моделирование.

Предложенный подход открывает возможности для анализа надежности, включая оценку резервирования узлов и выявление уязвимых элементов на основе графовых моделей, что способствует повышению устойчивости энергосистем в условиях интеграции ВИЭ. Разработанный алгоритм может служить основой для создания систем поддержки принятия решений при проектировании и эксплуатации крупных энергосистем.

Ключевые слова: диакоптика, электрические сети, топология, теория графов, модель, узел, режим.

Введение

В условиях глобальной трансформации электроэнергетического комплекса, связанной с активным внедрением возобновляемых источников энергии (ВИЭ), развитием распределённой генерации, цифровизацией процессов управления и формированием интеллектуальных электроэнергетических систем (Smart Grid) [1; 2; 3], существенно возрастает значимость задач обеспечения надёжности, устойчивости и адаптивности режимов работы энергосистем. Современные энергосистемы приобретают сетевую, иерархическую и модульную структуру, что требует применения новых аналитических форматов и методов расчёта, адекватных возросшей структурной и динамической сложности объектов [4; 5; 6].

Традиционные подходы к анализу и оптимизации, основанные на представлении энергосистемы как единого монолитного объекта, в условиях крупномасштабных сетей, высокой размерности математических моделей и стохастического характера генерации ВИЭ сталкиваются с существенными вычислительными, методическими и практическими ограничениями.

В данном контексте метод диакоптики представляет собой актуальный и методологически обоснованный инструмент анализа сложных электроэнергетических систем [6; 7; 8]. Его ключевая особенность заключается в реализации принципа декомпозиции, предполагающего разбиение исходной системы на совокупность взаимосвязанных, но автономно анализируемых подсистем. Такой подход позволяет формировать расчётные модели отдельных регионов, узлов или микросетей с различным характером генерации и нагрузки, включая зоны с высокой долей нестабильных ВИЭ, с последующим согласованным синтезом глобального решения.

Применение диакоптического подхода обеспечивает ряд принципиальных преимуществ:

– существенное снижение вычислительной сложности и повышение масштабируемости моделей, что особенно важно при выполнении расчётов в реальном времени и сценарного анализа;

– повышение гибкости и адаптивности управления, за счёт возможности независимой оптимизации режимов отдельных подсистем с учётом их локальных технических и нормативных ограничений;

– упрощение анализа межсистемных связей, включая координацию потоков мощности, оценку устойчивости и минимизацию потерь в соответствии с требованиями действующих стандартов и регламентов.

Метод диакоптики формирует методологическую основу перехода от централизованных и монолитных расчётных схем к модульным и иерархическим моделям, что полностью соответствует современным тенденциям развития электроэнергетики. В настоящей статье рассматриваются принципы применения диакоптического подхода, приводятся результаты его апробации на тестовых моделях и обсуждаются перспективы использования метода для задач анализа и оптимального управления энергосистемами в условиях высокой доли ВИЭ и цифровизации энергетической отрасли [9; 10].

Материалы и методы

Проведенный анализ литературы показывает, что, несмотря на длительную историю развития метода диакоптики, большинство существующих работ ориентированы на энергосистемы средней размерности (до нескольких десятков узлов). Классические подходы [1] и их современные модификации [4] демонстрируют эффективность на тестовых схемах, однако их масштабирование на крупные системы с тысячами узлов сопряжено с высокими вычислительными затратами из-за необходимости последовательных итераций.

Кроме того, крайне ограничено число исследований, в которых метод диакоптики применяется непосредственно к анализу больших энергосистем в условиях интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Современные тенденции развития электроэнергетики требуют учета нестабильной генерации и усложнения топологии, что делает эту задачу особенно актуальной.

Таким образом, настоящее исследование восполняет выявленный пробел, распространяя метод диакоптики на крупные энергосистемы и демонстрируя снижение вычислительных затрат и повышение надежности при определении обобщенных параметров.

Для преодоления вычислительных ограничений традиционных методов при анализе крупных энергосистем в данной работе применяется метод диакоптики. Основой служит подход Г. Крона [1], модифицированный и развитый в исследованиях [5].

Задачи метода и последовательность их решения:

– Топологическое моделирование системы. На основе схемы энергосистемы (Рис. 1) методами теории графов строится её граф, определяются матрица инциденций и осуществляется декомпозиция на связанные подсистемы.

– Расчёт параметров подсистем. Для каждой выделенной подсистемы независимо вычисляются собственные матрицы обобщённых параметров (собственные Z-матрицы).

– Учёт связей между подсистемами. Формируется матрица токораспределения, математически описывающая взаимодействия на границах декомпозиции (в ветвях разделения).

– Синтез общих параметров. На основе матриц подсистем и матрицы связей выполняется сборка полной матрицы обобщённых параметров (Z-матрицы) для всей энергосистемы.

Предлагаемый метод направлен на достижение кардинального (на несколько порядков) сокращения объема вычислений при анализе режимов, оптимизации потоков мощности и оценке устойчивости крупных энергосистем, с обязательным сохранением требуемой точности расчетов. Достоверность и эффективность разработанной методики подтверждены ее апробацией в рамках конференции.

В качестве основы для сопоставления результатов использована модель энергосистемы (Рисунок 1). Применение теории графов для исследования топологии сети позволило получить важные данные о структуре и функциональных особенностях сложного энергообъекта. Математический аппарат теории графов обеспечил эффективное моделирование взаимосвязей в системе, что углубило понимание ее динамики и существенно упростило решение задач по оптимизации и управлению.

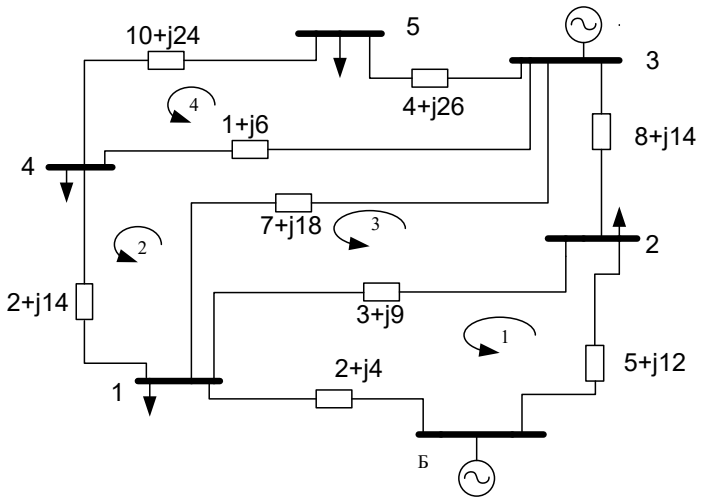


Рисунок 1 – Схема энергосистемы

В основе анализа структуры энергосистемы лежит теория графов, которая позволяет представить ее в виде совокупности двух элементов: узлов (вершин) и соединяющих их ветвей (ребер). В данной модели узлы символизируют генераторы, трансформаторы и центры потребления, а ветви – линии передачи, обеспечивающие их взаимосвязь.

При разработке метода приняты следующие допущения:

– энергосистема рассматривается как линейная, что справедливо для установившихся режимов и расчетов токов короткого замыкания.

– параметры ветвей (сопротивления, проводимости) считаются постоянными и не зависящими от режима работы.

– все узлы системы сохраняются при декомпозиции (полнота графа).

– ветви разделения выбираются таким образом, чтобы сохранялась связность подсистем.

– матрицы инциденций строятся для ориентированного графа с произвольно выбранными направлениями ветвей.

Топология системы должна быть известна полностью, так как частично определенные графы требуют предварительного восстановления связей.

На рисунке 2 приведено графическое отображение такой модели: исходная схема и соответствующий ей направленный граф, где каждый узел и каждая ветвь имеют индивидуальный номер.

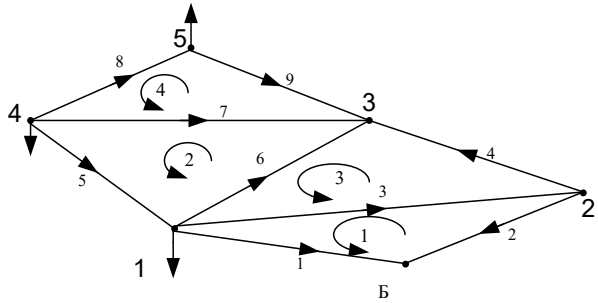


Рисунок 2 – Схема графов энергоситемы

Энергосистема представляется в виде ориентированного графа G(V, E), где V – множество узлов (|V| = n), E – множество ветвей (|E| = m). Для исследуемой схемы n = 11, m = 21. Чтобы разомкнуть все циклы (контуры) в графе, оставив при этом все узлы нетронутыми, требуется удалить наименьшее возможное число связей. Результат такой операции – образование деревьев графа. На рисунке 3 показаны 2 варианта дерева графа для одной и той же энергосистемы из 75 деревьев.

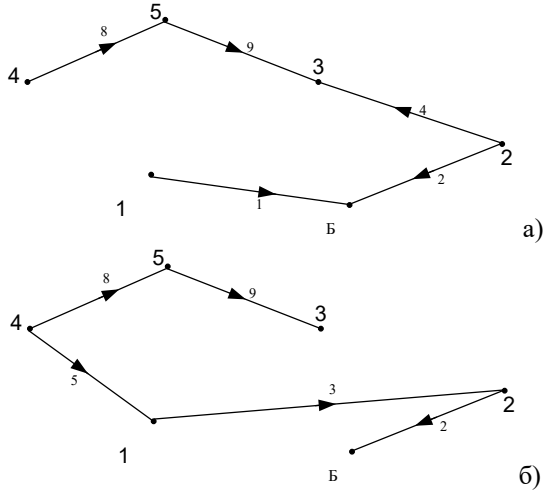


Рисунок 3 – Варианты деревьев графа для энергосистемы:
(а) дерево графа с началом в узле 1,
(б) дерево графа с началом в узле базового узла

Ветви, которые были удалены в процессе построения дерева, именуются хордами графа. Их последовательное присоединение к исходной древовидной структуре приводит к образованию замкнутых контуров. Следовательно, количество независимых контуров в электрической цепи строго соответствует числу хорд.

Переходя к аналитическому описанию энергосистемы, следует отметить, что в его основе может лежать любое из множества возможных деревьев графа, поскольку выбор конкретной формы дерева не влияет на количество уравнений, описывающих систему. Для иллюстрации на рисунке 3 приведены два варианта таких деревьев.

Традиционный подход требует расчета обобщенных параметров для каждой подсистемы с последующим учетом соединительных ветвей и объединением в единую матрицу.

Результаты и обсуждения

Предложенный алгоритм учитывает все ветви сети одновременно, что позволяет кратно сократить вычислительные затраты и повысить общую эффективность расчетов. Составляется диагональная матрица $\underline{Z}_V$ размерности m × m, где диагональные элементы равны сопротивлению соответствующей ветви. Исходными данными для программы служат значения сопротивлений ветвей $\underline{Z}_V$, определяемые по схеме на рисунке 1. Указанные сопротивления формируют диагональную матрицу, элементами которой являются комплексные числа:

$$\underline{Z}_V = \mathrm{diag}\{2+4i,\ 5+12i,\ 3+9i,\ 8+14i,\ 2+14i,\ 7+18i,\ 1+6i,\ 10+24i,\ 4+26i\}$$

Топология энергосистемы описывается матрицей инцидентности M (таблица 1), которая устанавливает соответствие между узлами и ветвями, отображая структуру связей системы. Строки матрицы идентифицируют узлы, столбцы – ветви. Заполнение матрицы осуществляется по направленному графу (рисунок 2) по следующему правилу: элемент mij принимает значение +1, если j-я ветвь исходит из i-го узла; −1, если ветвь входит в узел; и 0 при отсутствии связи между данным узлом и ветвью.

Таблица 1 – Матрица 2 инцидентности M

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
1	1	0	1	0	-1	1	0	0	0
2	0	1	-1	1	0	0	1	0	0
3	0	0	0	-1	0	-1	-1	0	-1
4	0	0	0	0	1	0	1	1	0
5	0	0	0	0	0	0	0	-1	1

Нулевые элементы соответствуют отсутствию связи. Построение полной матрицы инциденций является ключевым этапом, так как именно она позволяет в дальнейшем перейти к одновременному учету всех ветвей без последовательного наращивания схемы.

Предложенный подход упрощает расчёты за счёт одновременного учёта всех ветвей сети. Использование матриц инцидентности M и токораспределения C (таблица 2) обеспечивает точное описание связей в системе, что важно для её анализа и оптимизации. На основе матрицы инциденций и матрицы проводимостей ветвей была рассчитана матрица токораспределения C. Фрагмент матрицы представлен в таблице 2. Значения коэффициентов токораспределения показывают, как токи ветвей распределяются между узлами системы

Матрица потоков распределения C определяется по формуле:

$$\underline{C} = \underline{Z}_v^{\,T} * M * \underline{Z}_v \qquad (1)$$

Таблица 2 – Матрица 3 потоков распределения C

	1	2	3	4	5
1	1.5940+0.2530i	0.1027+0.2780i	0.0506+0.1450i	0.0506+0.1450i	0.0506+0.1450i
2	0.1458+0.4080	1.7223+0.6140i	−0.0673−0.1930i	0.0979+0.2670i	−1.8987−1.0960i
3	0.1229+0.3170i	−0.0981−0.2990i	1.8827+0.7230i	−0.0778−0.2240i	−1.8297−0.5170i
4	0.0886+0.2410i	0.1558+0.4470i	−0.1120−0.3340i	1.9667+0.8110i	−2.0991−1.1650i
5	−0.1052−0.2900i	0.0001+0.0000i	0.0000+0.0001i	0.1052+0.2900i	0.0000+0.0011i
6	0.1561+0.4030i	0.0011+0.0000i	−0.0892−0.2760i	0.0011+0.0000i	−0.0669−0.1270i
7	0.0000+0.0011i	0.2792+0.8010i	−0.2678−0.7700i	0.2836+0.8190i	−0.2950−0.8500i
8	0.0000+0.0011i	0.0000+0.0011i	0.0000+0.0011i	0.1047+0.3020i	−0.1047−0.3020i
9	0.0000+0.0011i	0.0000+0.0011i	−0.0518−0.1490i	0.0000+0.0011i	−0.0518−0.1490i

По формуле (1) нашли матрицу обобщенных параметров $\underline{Z}$ (таблица 3):

$$\underline{Z} = \underline{C}^T * \underline{Z}_v * \underline{C} \quad (2)$$

Таблица 3 – Матрица 4 обобщенных параметров $\underline{Z}$

	1	**2**	**3**	**4**
1	2.176+6.882i	1.266+3.525i	1.591+5.015i	1.857+5.942i
2	1.266+3.525i	1.590+4.410i	1.723+4.913i	1.986+6.106i
3	1.591+5.015i	1.723+4.913i	2.604+8.054i	2.427+7.540i
4	1.857+5.942i	1.986+6.106i	2.427+7.540i	2.954+9.110i

Также можно определить токи и напряжение в электрической системе по формулам

$$\underline{I} = \underline{Z}_v^{-1} * \underline{Z}_v * \underline{C} * \underline{J}, \underline{U} = \underline{C}^T * \underline{Z}_v * \underline{C} * \underline{J} \quad (3)$$

где $\underline{J}$ столбцевая матрица задающих токов.

Если принять $\underline{J}$=[2, −1, 3, 0]^T А, то

U=[7.859+25.284j, 6.111+17.379j, 9.271+29.279j, 9.009+28.398j]^T

Для каждой ветви k, соединяющей узел и базу $I_k=Y_k(U_p-U_q)$ то $\underline{I}$=[5.8427+0.9566j, 1.4153+0.0802j, 0.8488+0.0887j, 0.5436−0.1960j, 0.2065+0.0494j, 0.1663−0.0068j, 0.001−0.001j, 1.1415+0.1002j, 1.1536−0.1791j]^T

Диакоптика позволяет проводить комплексный анализ надёжности энергосистем, включая оценку резервирования и устойчивости к отказам, производить анализ доступности резервных мощностей в узлах, оценить надёжность и пропускную способность линий электропередач, помогает определить, насколько система готова к перераспределению нагрузок в случае выхода из строя отдельных элементов.

Анализ показывает, что предложенный модернизированный диакоптический метод имеет как сильные стороны, так и ограничения. Ключевое преимущество подхода заключается в отсутствии накопления погрешности, характерного для традиционного метода диакоптики при дроблении схемы на множество подсистем, если систему делить на подсистемы, то при решении накапливается погрешность, примерно в 2 %. Однако, платой за высокую точность является увеличение времени расчета по сравнению с классическим делением на подсистемы.

Выводы

Проведённое исследование показало, что модернизированный метод диакоптики является эффективным инженерным инструментом анализа и управления сложными электроэнергетическими системами в условиях децентрализации генерации и высокой доли возобновляемых источников энергии. В отличие от традиционных централизованных расчётных подходов, предложенный метод обеспечивает масштабируемость моделей и адаптацию унаследованных сетей к современной архитектуре энергосистем.

Результаты расчётов для крупномасштабных сетей со сложной топологией подтверждают повышение точности и вычислительной эффективности: погрешность снижена на 2 %. В отличие от существующих подходов, требующих последовательного (итеративного) наращивания схемы, предложенный метод учитывает топологию всей сети одновременно, что позволяет исключить вычислительную сложность, характерную для многоузловых систем.

Проведенный анализ показывает, что расчет единой системы гарантирует высокую точность и отсутствие эффекта накопления ошибки, характерного для декомпозиционных методов.

Метод диакоптики также повышает надёжность и устойчивость энергосистем, обеспечивая корректное моделирование аварийных режимов, анализ резервных путей и выявление критически уязвимых узлов с использованием графовых моделей. Дополнительно показано, что разработанный алгоритм может служить основой для создания цифровых двойников энергосистем и оптимизации потоков мощности, что подтверждает его высокую практическую ценность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Kron, G.** Tensor analysis of rotating machinery // Electrical Engineering. – 1933. – Vol. 52(1). – P. 51–51. – https://doi.org/10.1109/EE.1933.6430593

2 **Pu, H., Fan, X. and Zhen, Z.** Fault Section Location Method of Distribution Network Based On Graph Attention Network. – SSRN Preprint. – https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5342027

3 **Akhmetbaev, D. S., Jandigulov, A. R. and Akhmetbaev, A. D.** Improving Algorithms for Searching for Trees of Directed Graphs of Electrical Power Systems // Power Technology and Engineering. – 2024. – Vol. 58(2). – P. 349–355. – https://doi.org/10.1007/s10749-024-01819-6

4 **Zhantlessova, A., Akhmetbayev, D., and Issabekova, B.** Determination of Generalised Parameters of Large Power Systems By the Diacoptics Method //

2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – 2024. – P. 443–447. – https://doi.org/10.1109/UralCon62137.2024.10718917

5 **Labrador Rivas, E. and Abrão, T.** Faults in smart grid systems: Monitoring, detection and classification // Electric Power Systems Research. – 2020. – Vol. 189. – P. 106602. – https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106602.

6 **Ali, O., Elmarghany, M. R., Abdelsalam, M. M., Sabry, M. N. and Hamed, A. M.** Closed-loop home energy management system with renewable energy sources in a smart grid: A comprehensive review // Journal of Energy Storage. – 2022. – Vol. 50. – P. 104609. – https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104609

7 **Matousek, D. and Brtnik, B.** Diakoptic Method as a Generalized Form of the Thevenin' s Theorem // 2022 32nd International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA). – 2022. – P. 01–04. – https://doi.org/10.1109/RADIOELEKTRONIKA54537.2022.9764948

8 **Gao, H., Yu, X., Sui, Y., Shao, F. and Sun, R.** Topological Graph Convolutional Network Based on Complex Network Characteristics // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 64465–64472. – https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3183103

9 **Lai, X., Cao, M., Liu, S. and Sun, C.** Low-voltage distribution network topology identification method based on characteristic current // 2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). – 2021. – P. 1233–1238. – https://doi.org/10.1109/ACPEE51499.2021.9437092

10 **Pesteh, S., Moayyed, H. and Miranda, V.** Favorable properties of Interior Point Method and Generalized Correntropy in power system State Estimation // Electric Power Systems Research. – 2020. – Vol. 178. – P. 106035. – https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106035

Поступило в редакцию 26.04.26.
Поступило с исправлениями 29.04.26.
Принято в печать 31.08.26.

*А. Б. Жантлесова[1], А. Д. Умурзакова[2], А. Е. Еруланова[3], П. Ш. Мади[4], *А. Г. Калтаев[5]*
[1,2,3,4]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[5]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
26.04.26 ж. баспаға түсті.
29.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ДИАКОПТИКА ӘДІСІМЕН ЭНЕРГИЯ ЖҮЙЕСІНІҢ ЖАЛПЫЛАНҒАН ПАРАМЕТРЛЕРІН АНЫҚТАУ

Тұтынушылардың көбеюі және жаңартылатын энергия көздерін (ЖЭК) өндірудің тұрақсыз сипаты ірі электр жүйелерін модельдеудің дәстүрлі әдістерінің тиімділігін төмендетеді. Жүйенің ішкі жүйелерге ыдырауына негізделген диакоптика әдісі есептеу көлемін азайтуға мүмкіндік береді, бірақ классикалық іске асырулар тізбектің дәйекті (итеративті) өсуін талап етеді, бұл масштабтау кезінде жоғары есептеу шығындарына әкеледі.

Бұл мақалада энергия жүйелерінің жалпыланған параметрлерін (z-матрицаларын) есептеу үшін диакоптика әдісін өзгерту ұсынылады. Схеманы дәйекті түрде құруға негізделген классикалық тәсілден айырмашылығы (мысалы, классикалық Крон әдісі), ұсынылған әдіс бүкіл желінің топологиясын бір уақытта ескереді.

Зерттеу графиктер теориясына (оқиға матрицалары мен ток тарату матрицаларын құру) және матрицалық талдауға негізделген. Күрделі жүйенің әртүрлі генерация және жүктеме сипаттамалары бар өзара әрекеттесетін ішкі жүйелерге ыдырауы әрбір Ішкі жүйе үшін жалпыланған параметрлерді дербес есептеуге мүмкіндік береді, содан кейін жалпы шешімге біріктіріледі, бұл есептеу көлемін азайтады және модельдеуді жеңілдетеді.

Ұсынылған тәсіл сенімділікті талдауға, соның ішінде түйіндерді резервтеуді бағалауға және графикалық модельдер негізінде осал элементтерді анықтауға мүмкіндік береді, бұл ЖЭК интеграциясы жағдайында энергия жүйелерінің тұрақтылығын арттыруға ықпал етеді. Әзірленген алгоритм ірі электр желілерін жобалау және пайдалану кезінде шешімдерді қолдау жүйелерін құруға негіз бола алады.

Кілтті сөздер: диакоптика, электр желілері, топология, графика теориясы, модель, түйін, режим.

*A. B. Zhantlessova[1], A. D. Umurzakova[2], A. E. Yerulanova[3], P. S. Madi[4], *A. G. Kaltayev[5]*
[1,2,3,4]S. Seifullin Kazakh State University, Republic of Kazakhstan, Astana;
[5]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 26.04.26.
Received in revised form 29.04.26.
Accepted for publication 31.08.26.

DETERMINATION OF GENERALIZED PARAMETERS OF THE POWER SYSTEM BY THE METHOD OF DIACOPTICS

The growing number of consumers and the unstable nature of the generation of renewable energy sources (RES) reduce the effectiveness of traditional methods of modeling large energy systems. The method of diacoptics, based on the decomposition of the system into subsystems, reduces the amount of calculations, however, classical implementations require sequential (iterative) circuit expansion, which leads to high computational costs when scaling.

This article proposes a modification of the diacoptic method for calculating generalized parameters (Z-matrices) of power systems. Unlike the classical approach based on sequential circuit expansion (for example, the classical Crohn's method), the proposed method takes into account the topology of the entire network at the same time.

The research is based on graph theory (construction of incidence matrices and current distribution matrices) and matrix analysis. The decomposition of a complex system into interacting subsystems with different generation and load characteristics makes it possible to independently calculate generalized parameters for each subsystem, followed by integration into a common solution, which reduces the amount of calculations and simplifies modeling.

The proposed approach opens up opportunities for reliability analysis, including node redundancy assessment and identification of vulnerable elements based on graph models, which helps to increase the stability of energy systems in the context of renewable energy integration. The developed algorithm can serve as a basis for creating decision support systems for the design and operation of large power systems.

Keywords: diacoptics, electrical networks, topology, graph theory, model, node, mode.

МРНТИ 44.29.29
https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/293-309

С. В. Ибрагимова[1], А. Н. Старчеус[2], П. В. Кирий[3], М. Т. Айтуарова[4]
[1,3,4]Костанайский региональный университет имени А. Байтұрсынұлы, Республика Казахстан, г. Костанай;
[2]Рудненский индустриальный университет, Республика Казахстан, г. Рудный.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2798-9149
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1073-3822
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9462-9139
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3729-0596
*e-mail: ibragimovasvetlana75@gmail.com

РЕАЛИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ ПРИНЦИПОВ ВИРТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭНЕРГОСИСТЕМ СО СМЕШАННЫМ ТИПОМ ГЕНЕРАЦИИ

Статья посвящена анализу архитектурных принципов построения виртуальных электростанций и исследованию возможностей их реализации в рамках имитационного моделирования в условиях цифровизации энергетического сектора. На основе системного анализа и международных подходов предложена унифицированная архитектура виртуальных электростанций, включающая пять функциональных уровней – «Бизнес», «Функция», «Информация», «Коммуникация», «Компоненты», – которая позволяет интегрировать систему распределения энергоресурсов, средства телеметрии, аналитические модули, оптимизационные алгоритмы и интерфейсы взаимодействия рынка электрической энергии и мощности с системным оператором. Показана применимость модели виртуальной электростанции для повышения гибкости, надёжности и адаптивности энергосистемы со смешанным типом генерации. Предложенные подходы реализованы в программе-симуляторе, позволяющей моделировать энергосистему с учетом географического месторасположения, климатических и погодных условий и типов источников генерируемой мощности.

Важной характеристикой модели является возможность оценки стохастического характера энергосистемы по критерию надёжности электроснабжения, что повышает точность прогнозирования и расчёта режимов работы. Программа поддерживает сохранение и повторную загрузку экспериментов, реализует автоматическое и ручное управление с возможностью настройки функций станций и параметров оборудования, а также снабжена функцией интеллектуального советника.

Ключевые слова: виртуальная электростанция, распределённые энергоресурсы, архитектура виртуальной электростанции, возобновляемые источники энергии, цифровой двойник, оптимизация управления, моделирование.

Введение

Виртуальная электростанция – это программно-аппаратный комплекс, объединяющий разнородные источники генерации (традиционные и альтернативные), системы накопления энергии, управляемые нагрузки и электромобили в единый управляемый пул, способный участвовать в общей государственной системе рынка электроэнергии и мощности и предоставлять услуги. Развитие виртуальных электростанций (Virtual Power Plants, VPP) в последние годы стало одним из ключевых направлений трансформации электроэнергетических систем, обусловленным ростом доли распределённой генерации и возобновляемых источников энергии (ВИЭ). [1]

Одним из наиболее значимых примеров успешной реализации данной концепции является деятельность компании Next Kraftwerke, Кёльн, Германия, которая представляет собой одного из крупнейших операторов виртуальных электростанций в Европе и одновременно выступает сертифицированной электроснабжающей организацией на ряде европейских энергетических бирж. Основу её бизнес-модели составляет агрегация распределённых энергетических ресурсов, включая объекты возобновляемой генерации, системы накопления энергии и гибкие потребители. Компания объединяет более 14 000 децентрализованных установок, а также промышленные и коммерческие нагрузки с возможностью регулирования потребления. Совокупная установленная мощность виртуальной электростанции компании оценивается приблизительно в 12,7 ГВт, а годовой объём выработки составляет около 15 ТВт·ч, что эквивалентно приблизительно 3 % общей генерации электроэнергии Германии [2].

Наряду с промышленно-ориентированной моделью, характерной для Германии, в ряде стран формируются альтернативные подходы к развитию

VPP. Так, в южной части Австралии реализуется проект Tesla Virtual Power Plant, ориентированный преимущественно на домохозяйства [3]. Данная модель базируется на широком внедрении солнечных панелей и систем накопления энергии при активной поддержке государственных программ субсидирования. В отличие от немецкой практики, акцент здесь сделан на вовлечение частных потребителей в процессы генерации и управления электроэнергией.

К странам, демонстрирующим сопоставимый уровень развития виртуальных электростанций, постепенно приближаются Великобритания и Китай, где активно формируются рынки гибкости и развиваются механизмы интеграции распределённых ресурсов. В Японии импульс к развитию VPP был во многом обусловлен последствиями аварии на атомной электростанции «Фукусима-1», после которой приоритет был смещён в сторону повышения устойчивости энергосистемы, автономности и её способности противостоять аварийным ситуациям [4].

В то же время в ряде стран, таких как США, Чехия и Польша, развитие виртуальных электростанций находится на более ранней стадии и представлено преимущественно отдельными пилотными проектами и локальными инициативами [5, 6].

Таким образом, международный опыт показывает, что виртуальные электростанции становятся важным инструментом повышения гибкости и устойчивости современных энергосистем, однако темпы и модели их внедрения существенно различаются в зависимости от институциональной среды, уровня развития энергетических рынков и государственной политики в области энергетики. Однако, несмотря на растущий международный опыт применения VPP, в Казахстане отсутствуют унифицированные архитектурные модели и методологический аппарат для их проектирования и внедрения [7]. В современных условиях, когда энергетический сектор Казахстана находится на этапе трансформации и характеризуется ростом доли возобновляемых источников энергии, а также увеличением территориальной неравномерности спроса и предложения на фоне изношенной инфраструктуры концепция виртуальных электростанций представляет собой перспективное решение для агрегации распределённых энергоресурсов (Distributed Energy Resources, DER) и их эффективного управления [8].

Цель исследования, поставленная в работе, относится к анализу методологии создания унифицированной архитектуры VPP и её применения в ситуационном моделировании с целью создания модели цифрового двойника электрической системы со смешанной генерацией.

Материалы и методы

На разных этапах и уровнях создания виртуальных электростанций используется единая система проектирования, которая включает в себя системный анализ, в основе которого лежит методика Smart Grid Architecture Model (SGAM); методы функциональной декомпозиции и стохастической оптимизации, а также концепцию цифровых двойников (рисунок 1). В основе создания модели лежит подход системного анализа, рассматривающий VPP как сложную кибер-физическую систему [9]. Для формализации взаимодействия компонентов применяется система Smart Grid Architecture Model (SGAM), которая была разработана европейскими организациями CEN-CENELEC-ETSI в рамках мандата Европейской комиссии M/490 [10]. SGAM определяет пять взаимосвязанных уровней – это:

1) «Бизнес», который учитывает цели и модели участия в рынке электрической энергии и мощности;

2) «Функция» – охватывает процессы управления и балансировки;

3) «Информация» – отвечает за сбор данных и обмен информацией;

4) «Коммуникация» – формирует протоколы передачи данных;

5) «Компоненты» – включает физическое оборудование субъектов электроэнергетической системы.

На основе системного анализа и SGAM предлагается пятиуровневая архитектура VPP [10], которая состоит из пяти уровней, объединяющих распределённые энергоресурсы, коммуникационно-телеметрическую инфраструктуру, агрегацию и аналитику, оптимизацию и диспетчеризацию и внешний интерфейс (рисунок 1).

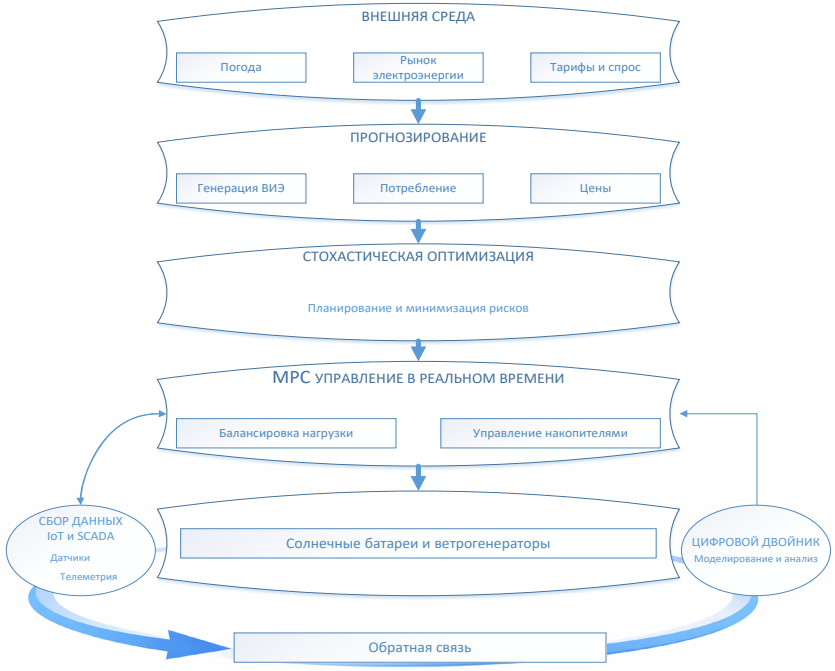


Рисунок 1 – Архитектура этапов проектирования виртуальных электростанций

Объединенная модель обеспечивает совместимость систем различных производителей и упрощает взаимодействие между участниками рынка, а масштаб ее применения (более чем 2000 проектов Smart Grid) в Европе продемонстрировало снижение времени внедрения разработок на 30–40 % за счёт унифицированного подхода к проектированию [11].

Структурирование системы осуществляется на этапе функциональной декомпозиции, которая позволяет разделить сложную систему VPP на независимые, разрабатывающиеся параллельно функциональные модули. Реализация такого подхода показывает снижение сложности проектирования на 25-35 % и улучшение масштабируемости системы [12].

Стохастическая оптимизация работы VPP [13] позволяет учитывать неопределённость прогнозов генерации источников альтернативной энергии и волатильность цен на рынке, а методика моделирования прогнозируемого управления [14] повышает точность прогнозирования

до 85–90 %, снижает операционные затраты на 15–20 % и уменьшает отклонение от графиков на 30–40 % [15].

Завершающим этапом создания виртуальной электростанции является создание цифрового двойника системы. Концепция цифровых двойников, предложенная американскими исследователями Майклом Гривсом и Джоном Викерсом [16] и развитая китайским ученым Фэй Тао [17], применяется для создания виртуальной модели объекта, позволяющей тестировать новые алгоритмы управления без риска для реальной системы. Цифровой двойник обеспечивает: моделирование различных сценариев работы, предиктивное обслуживание оборудования, оптимизацию параметров в режиме реального времени. Практика показывает, что использование цифровых двойников приводит к сокращению времени тестирования новых технологических решений на 60–70 % [17].

Результаты реализации единой системы проектирования с применением различных методик показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Применяемые методологии и достигнутые результаты.

Методология	Достигнутые результаты
SGAM (CEN-CENELEC-ETSI, 2012)	Снижение времени внедрения на 30-40 %, стандартизация взаимодействия
Функциональная декомпозиция (Kundur, 1994)	Снижение сложности на 25-35 %, улучшение масштабируемости
Стохастическая оптимизация (Morales, 2014)	Точность прогнозирования 85-90 %, снижение затрат на 15-20 %
Цифровые двойники (Grieves, 2017)	Сокращение времени тестирования на 60-70 %

Результаты и обсуждение

Реализуя архитектурные принципы единого проектирования на основе настоящего исследования, в среде разработки Unity разработан практический прототип виртуальной электростанции со смешанным типом генерирующих мощностей. В таблице 2 приведена структура функциональных модулей, реализующих задачи моделирования и анализа режимов работы электрической системы.

Таблица 2 – Архитектурная декомпозиция реализованных программных модулей

Модуль	Назначение	Входные данные	Выходные данные
СЭС	моделирование PV генерации	время суток, погодный множитель солнечной радиации, температура, модель фотоэлектрического модуля	потери от загрязнений и затенений, вырабатываемая мощность, P_{pv}
ВЭС	ветровая генерация	скорость ветра, модель и ориентация ветроэнергетической установки	Вырабатываемая мощность, P_{wind}
ТЭС, АЭС, ГЭС	тепловая генерация	вид топлива вид топлива, технические характеристики электростанции	P_{max}, P_{min}, КПД, расход топлива, выбросы углекислого газа
AI модуль	управление VPP	данные генерации и нагрузки	рекомендации
Итоговый системный сценарий	расчет режима	состав генерации, нагрузка, погодный сценарий	значения режимных показателей

Ключевой особенностью проекта является его представление не как абстрактной надстройки над энергетическими объектами, а как управляемого цифрового двойника. В зависимости от вида используемого физического оборудования при реализации SGAM-уровня «Компоненты» в приложении возможно использование 3D-модели электрической станции солнечного, ветрового, гидро- и атомного типа генерации как индивидуально, так и в режиме общей агрегации мощности. Реализация этапа функциональной декомпозиции основывается на принципе модульности, который обеспечивает каждый тип генерации самостоятельным скриптом с собственными физическими параметрами и внутренним состоянием. Фрагмент программной реализации расчета ветровой генерации приведен ниже:

```
float v = appliedWindSpeed;
float sweptArea = Mathf.PI * bladeLength * bladeLength;

float rotorYaw = (turbineYawObjects != null && turbineYawObjects.
Length > 0 && turbineYawObjects[0] != null)
               ? turbineYawObjects[0].eulerAngles.y
               : transform.eulerAngles.y;

float angleDiffDeg = Mathf.DeltaAngle(rotorYaw,
appliedWindDirection);
float angleDiffRad = angleDiffDeg * Mathf.Deg2Rad;
float cosTheta = Mathf.Max(0f, Mathf.Cos(angleDiffRad));
float yawFactor = cosTheta * cosTheta * cosTheta;

float rawPower = 0.5f * airDensity * sweptArea * Mathf.Pow(v, 3)
* conversionCoefficient;
float effectiveRaw = rawPower * yawFactor * generatorEfficiency;
powerPerTurbine = Mathf.Min(effectiveRaw, ratedPower);
```

Приведённый фрагмент программной реализации отражает алгоритм расчёта мощности ветровой генерации в составе виртуальной электростанции. Код учитывает физические параметры ветрового потока, ориентацию ротора и коэффициент полезного действия генератора, что позволяет получить оценку вырабатываемой мощности в режиме реального времени. Данный алгоритм используется в модуле ветровой генерации (рисунок 2) и влияет на формирование суммарного энергетического баланса системы.

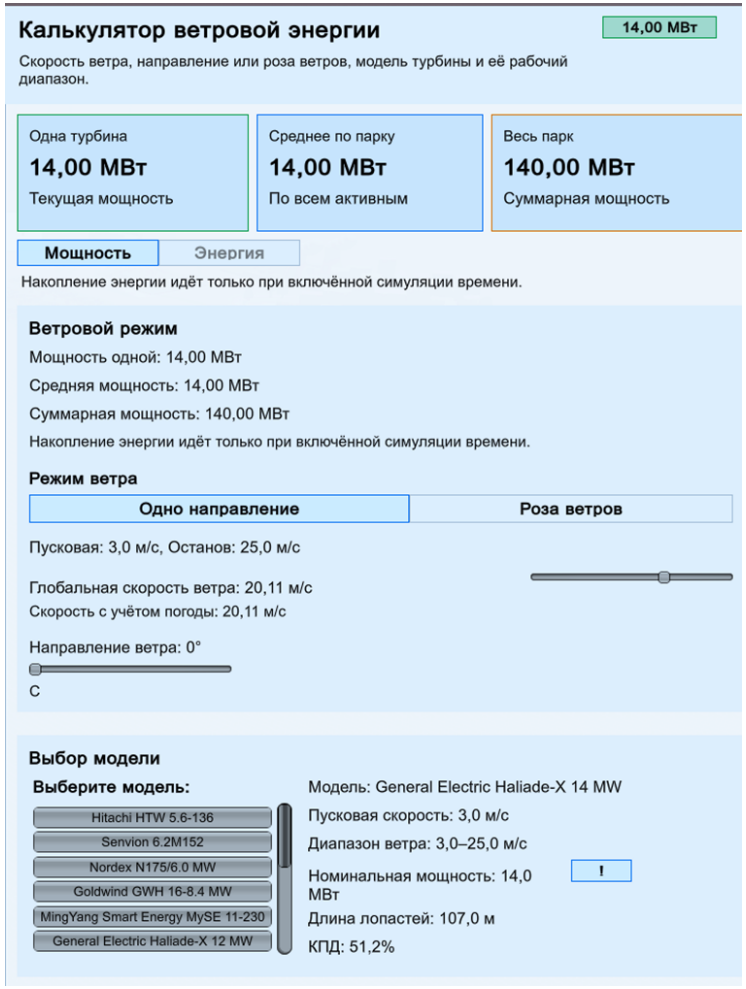


Рисунок 2 – Окно интерфейса VPP для модуля ветровой генерации

С целью проверки работоспособности исследовательского симулятора осуществлялась реализация сценариев, включающих модели оборудования из ресурсов проекта с фиксацией параметров нагрузки, погодных условий, временем суток и составом генерации. Подготовленные сценарии позволили оценить согласованность значений ручного счета и полученными в интерфейсе результатами. Допустимое расхождение оценивалось с учётом

округления, дискретности интерфейсных элементов, переходных процессов и внутренних поправочных коэффициентов. Результаты верификации для различного типа генерации приведены в таблицах 3, 4, 5.

Таблица 3 – Расчет выходной мощности солнечной панели

Проверяемое условие СЭС	**Вырабатываемая мощность/Ручной расчёт**	**Вырабатываемая мощность/ Значение в интерфейсе**
Ясный солнечный сценарий	498,8 Вт	499 Вт
Облачная погода, коэффициент ослабления 0,72	372,2 Вт	372 Вт
Ясная погода, время 16:00	496,1 Вт	496 Вт

Таблица 4 – Расчет выходной мощности ветровой электростанции

Проверяемое условие ВЭС	**Вырабатываемая мощность/Ручной расчёт**	**Вырабатываемая мощность/ Значение в интерфейсе**
v = 6 м/с, θ = 0°	0,875 МВт	0,8745 МВт
v = 8 м/с, θ = 0°	2,073 МВт	2,07 МВт
v = 10 м/с, θ = 0°	4,049 МВт	4,05 МВт
v = 8 м/с, θ = 20°	1,720 МВт	1,72 МВт

Таблица 5 – Расчёт мощностей АЭС, ГЭС, ТЭС

Источник	**Тип станции**	**Ручной расчёт**	**Значение в интерфейсе**
ГЭС	Kaplan River Мощность: 120 МВт Режим: ручной Открытие затвора: 30 %	41,1 МВт	41,05 МВт
ТЭС	Coal Unit Мощность: 300 МВт, Текущая уставка: 180 МВт Режим управления: ручной	174,6 МВт	174,6 МВт
АЭС	ВВЭР-1200, $P_{тепл}$=3212 МВт; КПД=0,373; коэффициент готовности=0,92.	1 102,2 МВт	1102,2 МВт

Визуальная сцена в программе используется не только как средство отображения, но и как цифровой полигон для инженерного расчёта режима сети, анализа временных профилей и принятия решений по управлению системой с использованием рекомендаций интеллектуального советника (рисунок 3).

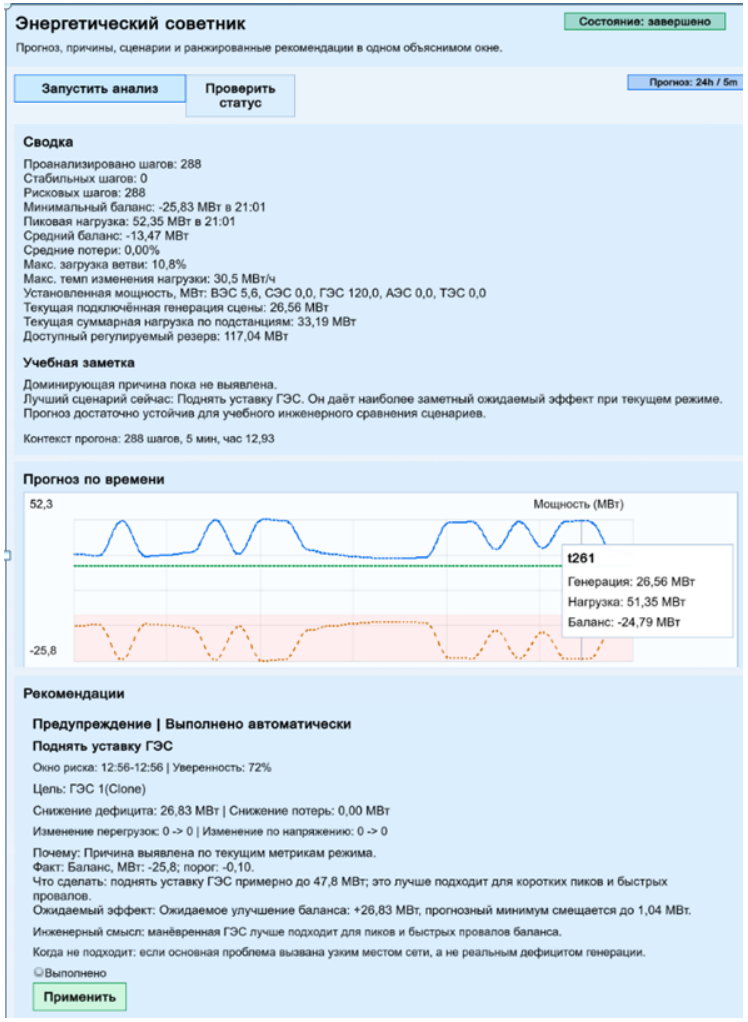


Рисунок 3 – Окно аналитического модуля рекомендаций

Аналитический модуль рекомендаций способен выявить в системе дефицит мощности и предложить варианты изменения сценария, заданного оператором. Алгоритм проверки состоит в следующем: модуль источника формирует генерируемую мощность, передаёт её в сетевую модель, далее проводится расчет энергетического баланса и формирование рекомендаций по улучшению текущего сценария (таблица 6) .

Таблица 6 – Проверка баланса мощности и рекомендации аналитического модуля

Показатель	Значение до изменения сценария	Значение после изменения сценария
Суммарная генерация, МВт	26,56 МВт	53,72 МВт
Пиковая нагрузка, МВт	52,35 МВт	52,35 МВт
Минимальный баланс, МВт	-25,83 МВт	1,37 МВт
Рекомендация аналитического модуля	Поднять уставку ГЭС до $P_{уст}$ = 47,8 МВт	нет

До изменения сценария суммарная генерирующая мощность системы была недостаточной для покрытия пиковой нагрузки, вследствие чего баланс мощности принимал отрицательное значение. В этих условиях аналитический модуль формировал рекомендацию по увеличению мощности гидроэлектростанции. После реализации предложенного управляющего воздействия суммарная генерация превысила величину нагрузки, что обеспечило положительный баланс мощности и привело к устранению предупреждающего сообщения о дефиците генерирующих ресурсов.

Повторяемость результатов, полученных в ходе серии вычислительных экспериментов, свидетельствует о работоспособности и устойчивости предложенного подхода. Разработанная архитектура обеспечивает возможность централизованной координации распределённых энергетических ресурсов и позволяет оперативно оценивать влияние изменений режимных параметров на состояние энергосистемы. Кроме того, реализация единой среды мониторинга и управления способствует повышению эффективности анализа сценариев функционирования системы и поддержке принятия диспетчерских решений.

Выводы

Исследуемая единая система проектирования, основанная на методиках SGAM, функциональной декомпозиции и стохастической оптимизации, а также унифицированную пятиуровневую архитектуру виртуальных

электростанций успешно реализована в проекте по созданию прототипа цифрового двойника электрической системы, включающей в себя традиционную и альтернативную форму генерации электрической энергии. Среда разработки Unity в связке с возможностями программирования LLM-моделей искусственного интеллекта может служить удобной оболочкой для интеграции энергетических расчётов, визуального интерфейса и интеллектуального управления, что делает её подходящей платформой для ранних этапов проектирования VPP. С инженерной точки зрения основным результатом можно считать возможность функционирования VPP на нескольких уровнях одновременно – агрегацию распределённой генерации, расчёт режима работы электрической сети с учётом ограничений по напряжению, потокам мощности и потерям, поддержка анализа сценариев и действия по предупреждению чрезвычайных ситуаций. Таким образом, созданный прототип цифрового двойника позволяет проводить тестирование и валидацию алгоритмов управления, моделировать различные сценарии работы системы, оптимизировать параметры без риска для существующей энергетической инфраструктуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Kazhina M., Kalysh I., Ukaegbu I. A., Nunna H. S. V. S. K.** Virtual Power Plant in Industry 4.0: The Strategic Planning of Emerging Virtual Power Plant in Kazakhstan [Text] // 21st International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). – IEEE, 2019. – P. 600-605 – https://doi.org/10.23919/ICACT.2019.8701989

2 Next Kraftwerke GmbH. Virtual Power Plant Technology. [Text] Cologne: Next Kraftwerke. – 2023. [Electronic resource]. – Available at: https://www.next-kraftwerke.com/vpp/virtual-power-plant

3 Tesla. Autobidder: Real-Time Trading and Control Platform. Technical Documentation. Palo Alto : Tesla Inc. – 2023. [Electronic resource]. – Available at: https://www.tesla.com/support/energy/tesla-software/autobidder (Accessed date: 16.01.2026).

4 International Renewable Energy Agency (2024). Renewable Energy Statistics. Abu Dhabi: IRENA. – 2024. [Electronic resource]. – Available at: https://www.irena.org/publications/2024/Jul/Renewable-energy-statistics-2024 (Accessed date: 16.01.2026).

5 ENTSO-E. Demand Connection Code. – Brussels: European Network of Transmission System Operators for Electricity. [Electronic resource]. – Available at: https://www.entsoe.eu/network_codes/dcc (Accessed date: 26.02.2026)

6 **Mehrhoff, J., Asmus, P.** Market Data: Mixed Asset Virtual Power Plant Models: Mixed-Asset Virtual Power Plant Capacity, Implementation Spending, and Revenue: Global Market Forecasts and Analysis // Guidehouse Insights. – 2020. [Electronic resource]. – Available at: https://guidehouseinsights.com/ (Accessed date: 26.02.2026).

7 Asian Development Bank. Kazakhstan: Country Partnership Strategy (2023–2027) [Text]. – Manila : Asian Development Bank, 2023. [Electronic resource]. – Available at: https://www.adb.org/documents/kazakhstan-country-partnership-strategy-2023-2027 (Accessed date: 28.02.2026).

8 KEGOC. KEGOC. Annual Report 2024 «Energy of Development». [Text] Nur-Sultan : AO «KEGOC». – 2024. [Electronic resource]. – Available at: https://ar2024.kegoc.kz

9 **Kundur, P.** Power System Stability and Control. EPRI Power System Engineering Series. [Text] New York : McGraw-Hill, 1994. – 1176 p. – ISBN 978-0-07-035958-1

10 CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group. Smart Grid Reference Architecture [Text] Brussels: European Commission. – 2012. [Electronic resource]. – Available at: https://www.cencenelec.eu/media/CEN-CENELEC/AreasOfWork/CEN-CENELEC_Topics/Smart%20Grids%20and%20Meters/Smart%20Grids/reference_architecture_smartgrids.pdf

11 **Pudjianto, D., Ramsay, C., Strbac, G.** Virtual Power Plant and System Integration of Distributed Energy Resources [Text] // IET Renewable Power Generation. – 1(1). – 2007. – P. 10–16 – https://doi.org/10.1049/iet-rpg:20060023

12 **Ramchurn, S. D., Vytelingum, P., Rogers, A., Jennings, N. R.** Agent-based control for decentralised demand side management in the smart grid [Text] // Proceedings of the 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2011). – Taipei, Taiwan, 2011. – P. 5–12. [Electronic resource]. – URL: https://www.ifaamas.org/Proceedings/aamas2011/papers/BP1_B39.pdf

13 **Morales, J. M., Conejo, A. J., Madsen, H., Pinson, P., Zugno, M.** Integrating Renewables in Electricity Markets: Operational Problems [Text] // International Series in Operations Research & Management Science. – Vol. 205. – Springer, New York. XVI, 2014. – 429 p. – https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9411-9

14 **Camacho, E. F., Bordons, C.** Model Predictive Control. 2nd ed. [Text] // Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. – Springer, London. XXII, 2007. – 405 p. – https://doi.org/10.1007/978-0-85729-398-5

15 **Loßner, M., Böttger, D., Bruckner, T.** Economic Assessment of VPPs in German Energy Market [Text] // Energy Economics. – 62. – 2017. – 155–164 p. – https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.12.008

16 **Grieves, M., Vickers, J.** Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems[Text] // Kahlen, F.J., Flumerfelt, S., Alves, A. (eds) // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. – Springer, Cham., 2017. – 85–113 p. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4

17 **Tao, F., Zhang, H., Liu, A., Nee, A. Y. C.** Digital Twin in Industry: State-of-the-Art [Text] // IEEE Transactions on Industrial Informatics. –15(4). – 2018. – P. 2405–2415 – https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186

Поступило в редакцию 11.04.26.
Поступило с исправлениями 23.04.26.
Принято в печать 02.09.26.

**С. В. Ибрагимова[1], А. Н. Старчеус[2], П. В. Кирий[3], М. Т. Айтуарова[4]*
[1,3,4]Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай Өңірлік университеті,
Қазақстан Республикасы, Қостанай қ.;
[2]Рудный индустриялық университеті,
Қазақстан Республикасы, Рудный қ.
11.04.26 ж. баспаға түсті.
23.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
02.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АРАЛАС ГЕНЕРАЦИЯ ТҮРІ БАР ЭНЕРГОЖҮЙЕЛЕРДІ МОДЕЛЬДЕУ КЕЗІНДЕ ВИРТУАЛДЫ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРЫНЫҢ АРХИТЕКТУРАЛЫҚ ҚАҒИДАТТАРЫН ІСКЕ АСЫРУ

Мақала энергетика секторын цифрландыру жағдайында виртуалды электр станцияларын құрудың архитектуралық қағидаттарын талдауға және оларды имитациялық модельдеу шеңберінде іске асыру мүмкіндіктерін зерттеуге арналған. Жүйелік талдау мен халықаралық тәжірибе негізінде «Бизнес», «Функция», «Ақпарат», «Коммуникация», «Компоненттер» атты бес функционалдық деңгейден тұратын виртуалды электр станциясының бірыңғай архитектурасы ұсынылды, ол энергия ресурстарын бөлу жүйесін, телеметрия құралдарын, аналитикалық модульдерді, оңтайландыру алгоритмдерін және электр энергиясы мен қуат нарығының жүйелік оператормен өзара әрекеттесу интерфейстерін біріктіруге мүмкіндік береді. Аралас

генерация типіндегі энергожүйенің икемділігін, сенімділігін және бейімделгіштігін арттыру үшін виртуалды электр станциясы моделінің қолданылу тиімділігі көрсетілді. Ұсынылған тәсілдер географиялық орналасуды, климаттық және ауа райы жағдайларын, сондай-ақ генерация көздерінің түрлерін ескере отырып энергожүйені модельдеуге мүмкіндік беретін бағдарламалық симуляторда іске асырылды. Модельдің маңызды сипаттамасы электрмен жабдықтау сенімділігі критерийі бойынша энергожүйенің стохастикалық сипатын бағалау мүмкіндігі болып табылады, бұл жұмыс режимдерін болжау мен есептеу дәлдігін арттырады. Бағдарлама эксперименттерді сақтау және қайта жүктеу мүмкіндігін қолдайды, станциялар функциялары мен жабдық параметрлерін баптай отырып автоматты және қолмен басқаруды жүзеге асырады, сондай-ақ интеллектуалды кеңесші функциясымен жабдықталған.

Кілтті сөздер: виртуалды электр станциясы, бөлінген энергетикалық ресурстар, виртуалды электр станциясының архитектурасы, жаңартылатын энергия көздері, цифрлық егіз, басқаруды оңтайландыру, модельдеу.

**S. V. Ibragimova[1], A. N. Starcheus[2], P. V. Kiriy[3], M. T. Aituarova[4]*
[1,3,4]Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University,
Republic of Kazakhstan, Kostanay;
[2]Rudny Industrial University,
Republic of Kazakhstan, Rudny.
Received 11.04.26.
Received in revised form 23.04.26.
Accepted for publication 02.09.26.

IMPLEMENTATION OF ARCHITECTURAL PRINCIPLES FOR VIRTUAL POWER PLANTS IN MODELING OF MIXED-GENERATION POWER SYSTEMS

The article is devoted to the analysis of architectural principles for constructing virtual power plants and to the study of possibilities for their implementation within simulation modeling under the conditions of digitalization of the energy sector. Based on system analysis and international experience, a unified architecture of a virtual power plant is proposed, consisting of five functional levels – "Business", "Function", "Information", "Communication", and "Components" – which makes it

possible to integrate the energy resource distribution system, telemetry tools, analytical modules, optimization algorithms, and interfaces for interaction between the electricity and capacity market and the system operator. The applicability of the virtual power plant model for increasing the flexibility, reliability, and adaptability of a mixed-generation power system is demonstrated. The proposed approaches were implemented in a software simulator that enables modeling of a power system while considering geographical location, climatic and weather conditions, as well as the types of generation sources. An important characteristic of the model is the ability to assess the stochastic nature of the power system according to the criterion of power supply reliability, which improves the accuracy of forecasting and operating mode calculations. The program supports saving and reloading experiments, provides automatic and manual control with the ability to configure plant functions and equipment parameters, and is also equipped with an intelligent advisor function.

Keywords: virtual power plant, distributed energy resources, virtual power plant architecture, renewable energy sources, digital twin, control optimization, modeling.

МРНТИ 44.29.31
https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/310-321

Ж. Б. Исабеков[1], *Б. Б. Исабекова[2], А. А. Шимпф[3], Л. Н. Есмаханова[4], Б. Е. Ордабаев[5]
[1,2,3,5]Торайгыров университет,
Республика Казахстан, г. Павлодар;
[4]Таразский университет имени М. Х. Дулати,
Республика Казахстан, г. Тараз.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3980-1617
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5044-3211
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4203-9117
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3308-9676
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5457-3490
*e-mail: asbizh@mail.ru

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

В работе приведено описание технологии интернета вещей, рассмотрены основные элементы системы программно-аппаратного комплекса. Наибольшее внимание уделено технологиям обеспечения связи с удаленными устройствами, поскольку они в наибольшей степени варьируются в зависимости от эксплуатационных условий и определяют особенности построения систем. Рассмотрены примеры применения интернета вещей в системах диспетчерского управления, варианты внедрения её в системы мониторинга и управления оборудованием существующих распределительных сетей, а также в составе интеллектуальных сетей постоянного тока, работающих совместно с возобновляемыми источниками энергии. На основании анализа технологий показана экономичность применения микропроцессорных устройств, отмечена целесообразность реализации функций защиты в программах полевых устройств, а также перспективность применения технологий интернета вещей для задач мониторинга оборудования и построения систем диспетчеризации.

Представлен метод идентификации однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в кабельных сетях с изолированной нейтралью.

В основе подхода лежит применение магнитоуправляемых контактов (герконов) для выявления токов нулевой последовательности, возникающих при повреждении, и последующей передачи данных в диспетчерскую службу по беспроводным каналам связи на базе технологий Интернета вещей (IoT). Такая интеграция в систему позволяет значительно сократить время поиска и ликвидации аварий, что способствует быстрому восстановлению штатного режима работы кабельной сети.

Ключевые слова: Интернет вещи, однофазные замыкания на землю, кабельные сети, магнитоуправляемые контакты, ток нулевой последовательности, мониторинг.

Введение

Интернет вещей является одной из наиболее активно развивающихся технологий последних лет. Количество посвященных этой теме публикаций только в системе SCOPUS за последние десять лет возросло в 24 раза. Стремительная актуализация связанных с ним вопросов связана с развитием всех ключевых составляющих технологии: повышения уровня проникновения интернета и скорости передачи данных во всех областях, позволивших выполнять хранение и обработку данных на удаленных серверах.

В результате стало возможным создание распределенных систем управления с обменом данными по сети интернет для широкого спектра отраслей промышленности. Был предложен ряд систем интернета вещей для решения широкого круга задач в области электроэнергетики. Опыт их создания и внедрения ставит новые научные вопросы. Чтобы повысить эффективность применения технологии интернета вещей в системах управления, защиты и автоматики для электроэнергетических систем, необходимо выполнить анализ и систематизацию задач; сформулировать критерии распределения функций между локальным полевым и удаленным оборудованием; определить принципы выбора технологий связи, так как требования к коммуникационным способностям являются одним из основных критериев выбора контроллеров в системах управления.

Материалы и методы

Интернет вещей, объединяя множество людей, устройств и процессов, обеспечивает их взаимодействие друг с другом в удобной форме. Его применение может улучшить технологии, сделав процессы более измеримыми путем сбора и переработки больших объемов данных. Применение интернета вещей обеспечивает повышение качества управления технологическими процессами и системами за счет создания возможностей

для автоматизированного принятия решений в режиме реального времени и упрощения инструментов для оптимизации таких решений [1; 2; 3].

Областью применения интернета вещей является любая техническая система, использующая его для обмена данными. Устройства интернета вещей в её составе могут являться интеллектуальными датчиками, исполнительными устройствами, шлюзами для обмена данными с промышленными системами и т.д. Протоколы связи обеспечивают передачу данных по сетям Ethernet в удобном виде, обеспечивающем малый размер сообщения, гибкость формата представления данных и надежность доставки информации. Применение интернета вещей требует хранения и обработки больших объемов информации, что выполняется при помощи специализированных хранилищ (баз данных). Анализ собранных данных требуется для принятия управляющих решений и может выполняться как в режиме реального времени, так и автономно, после сохранения данных, после чего принятые решения возвращаются устройствам [4].

В работах [5; 6] предложены прототипы распределенных систем контроля мощности солнечных панелей. Их основной задачей является дистанционный контроль освещенности, напряжения, тока и мощности панелей. В то же время, встроенный микроконтроллер дает возможность реализовать автономно действующие алгоритмы защиты от перегрузки по отдаваемой мощности, т.е. реализовать гибкое изменение уставки тока при различном выходном напряжении источника. Для связи используются типовые интерфейсные платы, обеспечивающие связь по технологиям Xbee, Wi-Fi либо Bluetooth.

Например, прототип системы управления, предложенный в [6], способен обеспечить защиту нагрузки в случае, если мощность, отдаваемая источником, превышает заданную уставку. Система мониторинга и защиты использует беспроводную связь при помощи модуля Wi-Fi ESP 8266, доступ к которому можно получить через веб-сайт. Устройство способно считывать токи до 5А с погрешностью 2,4 % и напряжения до 30В с погрешностью 0,073 %. Данные, считанные микроконтроллером, хранятся на карте памяти, а часть их отправляется в облачную базу данных. Система защиты в инструменте использует реле, причем задержка выдачи сигнала на его отключение составляет 54 нс. Эту систему можно использовать для механизмов контроля и защиты будущих интеллектуальных сетей на базе IoT (Интернета вещей) в составе «интеллектуальных сетей».

В работе [7] рассматривается замена системы релейной автоматики распределительной подстанции одноплатной ЭВМ Raspberry Pi. Для программирования ЭВМ авторы используют реализацию языков стандарта

МЭК 61331-3 в среде CoDeSys. Использование одноплатной ЭВМ дает системе дополнительные возможности, в частности, упрощается задача передачи данных с использованием одного из интерфейсов IoT для решения задач телеуправления и сбора диагностической информации. В то же время, задачи защиты реализуются алгоритмом работы микроЭВМ непосредственно.

Авторы отмечают такие преимущества предложенного решения, как высокое быстродействие и низкая стоимость оборудования. В то же время, недостатком работы является отсутствие сравнительного анализа электромагнитной совместимости в условиях близости силового оборудования, а также надежности программного обеспечения и цепей ввода-вывода данных для ПЛК и одноплатной ЭВМ. Можно ожидать, что в условиях малых объемов производства оборудования (тысячи единиц и менее) целесообразным решением будет применение ПЛК с установкой модулей связи для мониторинга режимов их работы по интерфейсам IoT.

В работе предложено использование модели Бержерона для линий электропередачи [8; 9; 10] с целью устранения емкостных эффектов и обеспечения отсутствия ложных срабатываний дифференциального реле.

Для реализации защиты используется интерфейс связи LoRaWAN, поскольку он обладает такими преимуществами, как двунаправленность, безопасность, мобильность и точность локализации, которые другие технологии не могут обеспечить. Предложен алгоритм ANFIS-PSO для распознавания неисправных линий и повторного подключения исправных линий на основе восстановления максимальной нагрузки и минимизации потерь мощности. Эффективность предложенного алгоритма защиты подтверждена авторами на математической модели, реализованной в среде MATLAB/Simulink [7].

В нашем случае была спроектирована экспериментальная установка с использованием микроконтроллера Arduino UNO для обработки данных и подготовки к отправке/приему на чипе ATmega 328. Радиомодуль Ra-02 на платформе SX1278 с частотой 433 МГц с использованием технологии LoRaWAN. И датчик тока ACS712 5A, аналоговый датчик.

Спроектированная установка имеет двухузловую архитектуру и состоит из передающего и приемного модулей на базе микроконтроллеров Arduino UNO. Функциональность узлов разделена: передающий модуль отвечает за проведение измерений и отправку данных, в то время как принимающий модуль специализируется на приеме, анализе и управлении подключенными устройствами.

Модуль передачи данных основан на плате Arduino UNO с микроконтроллером ATmega328P. Для сбора данных используются два датчика: аналоговый датчик ACS712, работающий по принципу эффекта Холла, обеспечивает измерение тока до 5 А, а для измерения напряжения используется резистивный делитель. Сигналы, снимаемые с датчиков, поступают на аналоговые входы A0 и A1, где встроенный 10-разрядный АЦП преобразует их в цифровую форму.

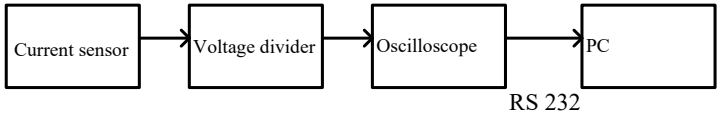
Написанная на C/C++ в среде Arduino IDE, программа организует непрерывный сбор текущих показаний в режиме реального времени. Полученные данные регулярно обновляются и упаковываются в цифровые пакеты для передачи по радиоканалу. В решении для беспроводной связи используется модуль Ra-02 на чипе SX1278, который использует технологию LoRa для передачи данных на частоте 433 МГц. Эта технология гарантирует стабильную и помехоустойчивую связь на больших расстояниях при низком энергопотреблении, что критически важно для систем удаленного мониторинга.

Принимающая сторона использует ту же плату Arduino UNO с модулем Ra-02, который отвечает за прием, декодирование и анализ входящих данных. Полученные значения тока и напряжения выводятся на монитор последовательного порта компьютера и могут быть сохранены в файл для дальнейшей обработки. Система отслеживает изменения параметров в режиме реального времени, гарантируя, что все отклонения от нормального режима работы будут зафиксированы.

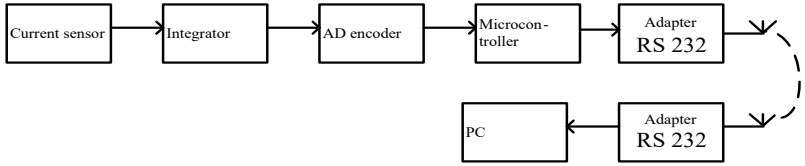
На рисунке 1а показана схема снятия сигнала с датчика тока, при этом осциллограф и ПК расположены в непосредственной близости от места измерения. Если необходимо обработать сигнал от датчика на некотором расстоянии от места установки, можно использовать беспроводную передачу данных через Интернет вещей с использованием беспроводных технологий Bluetooth (рис. 1б) [5]. Как видно из схемы, он разделен на мобильную часть (датчик тока – интегратор – кодировщик AD – микроконтроллер – BT) и стационарную часть (BT-PC). Следует отметить, что в степной зоне радиосигналы могут передаваться на расстояние не более 50 м. При использовании технологии передачи данных LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) расстояние в городских условиях может достигать 15 км. При использовании технологии NB-IoT (узкополосный интернет вещей) обеспечиваются низкие затраты на передачу данных и высокая чувствительность.

Предварительная обработка сигналов от датчиков тока непосредственно на месте (например, на устройстве регистрации датчика тока трансформатора) снижает нагрузку на центральные серверы.

Платформы SCADA/EMS IoT с облачным доступом предлагают преимущества сбора и визуализации данных в режиме реального времени со всех кабельных линий, а также возможность удаленного мониторинга состояния кабельной сети.



а)



б)

с)

Рисунок 1 – Схема снятия сигнала с датчика тока трансформатора:
(a) – схема снятия сигнала с датчика тока,
(b) – передача данных с использование IoT, (c) – установка.

Для передачи данных был разработан датчик тока, использующий магнитный контакт – геркон. Конструкция трансформаторного датчика тока с герконовым переключателем показана на рисунке 2. В его основе лежит кольцеобразный ферромагнитный направляющий магнитный поток 1 с поперечным воздушным зазором 2 и перпендикулярным к нему тангенциальным сквозным отверстием 3. В тангенциальном отверстии закреплен геркон с магнитным контактом 4 таким образом, что воздушный зазор его контактов совпадает с серединой поперечного зазора 2. Измерительная обмотка датчика тока трансформатора 5 используется для намагничивания (смещения). Эта обмотка подключена к источнику рабочего тока через регулировочный резистор. Таким образом, ток в обмотке намагничивания можно регулировать, изменяя значение этого резистора. Контакты магнитоуправляемого контакта 4 подключены к цепи отключения автоматического выключателя.

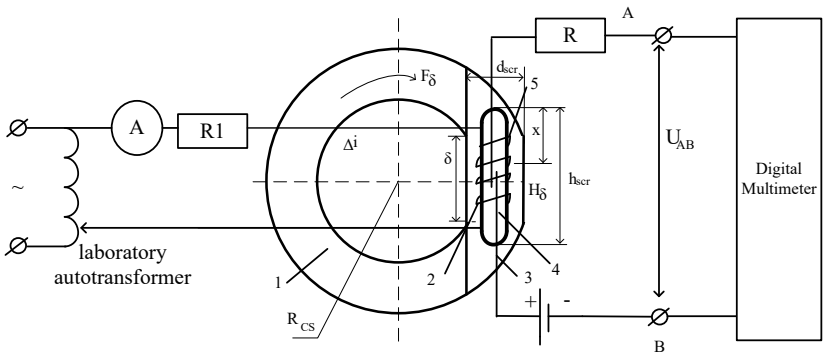


Рисунок 2 – Датчик измерения тока с магнитным контактом

Результаты и обсуждение

Предлагаемый датчик тока (рисунок 2) на основе магнитоуправляемого контакта (геркона) предназначен для регистрации тока нулевой последовательности (рисунок 3), возникающего при ОЗЗ, с последующей передачей данных по беспроводной сети Интернета вещей. Это дает возможность следить за состоянием кабельной сети с изолированной нейтралью напряжением 6-35 кВ в режиме реального времени. Использование этого датчика тока и передача данных через Интернет вещей повышают скорость обнаружения и точность локализации ОЗЗ, сокращают время восстановления электропитания и повышают надежность кабельных сетей.

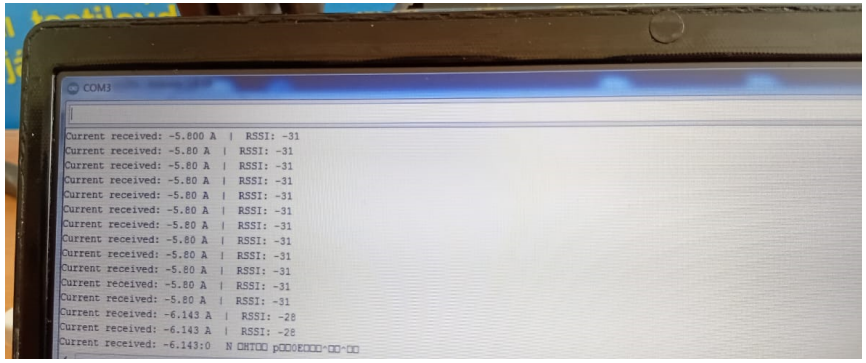


Рисунок 3 – Данные регистрации тока нулевой последовательности

Отличительной особенностью IoT является географическое разделение системы управления с датчиками и исполнительными устройствами с обеспечением связи между ними как по сети интернет, так и на части пути по специализированным каналам.

Такое решение имеет очевидные недостатки, связанные с тем, что передача данных на большое расстояние может занимать сравнительно большое время, иметь относительно низкую надежность, а также требовать дополнительных затрат энергии, что может быть существенно для систем малой мощности. По этим причинам принятие управляющих решений с высокими требованиями по быстродействию и надежности – в частности, по переключениям, связанным с необходимостью защиты от коротких замыканий – как правило, выполняется непосредственно полевыми устройствами.

В то же время, применение интернета вещей позволяет автоматизировать и персонализировать задачи мониторинга и управления устройствами благодаря переносу обработки данных на специализированный сервер, обслуживающий большое количество потребителей. Индивидуализация и автоматизация управления позволяет контролировать большое количество устройств в едином центре. Использование IoT чрезвычайно перспективно для решения задач автоматической диспетчеризации интеллектуальных сетей, включающих ВИЭ и накопительные устройства. Другим перспективным направлением использования IoT является анализ массивов данных для выявления неравномерностей нагрузки, а также прогнозирования отказов оборудования.

Информация о финансировании.

Исследование финансируется Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23486411).

Выводы

Быстрое взаимодействие датчиков с облачной платформой для удаленного мониторинга и анализа событий дает возможность определять ОЗЗ и ликвидировать его последствия. Практическая значимость работы подтверждается результатами моделирования. Быстрая ликвидация повреждения ведет к снижению ключевых показателей надежности: уменьшается средняя продолжительность перерывов электроснабжения (SAIDI), снижается риск каскадных отклонений и, как следствие, улучшается показатель частоты перерывов (SAIFI). Кроме того, автоматизация сбора данных повышает оперативность работы диспетчерских служб и ремонтных бригад, напрямую влияет на экономическую эффективность и коэффициент готовности сети.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Motlagh, N. H., Mohammadrezaei, M., Hunt, J., Zakeri, B.** Internet of things (IoT) and the energy sector // Energies. – 2020. – Vol. 13(2). – 494. – https://doi.org/10.3390/en13020494

2 **Shrouf, F., Ordieres, J., Miragliotta, G.** Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm // Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Selangor Darul Ehsan, Malaysia. – 2014. – P. 697–701. – https://doi.org/10.1109/IEEM.2014.7058728

3 **Bandyopadhyay, D., Sen, J.** Internet of Things : Applications and Challenges in Technology and Standardization // Wireless Personal Communications. – 2011. – Vol. 58. – P. 49–69. – https://doi.org/10.1007/s11277-011-0288-5

4 **Jia, M., Komeily, A., Wang, Y., Srinivasan, R. S.** Adopting Internet of Things for the development of smart buildings : A review of enabling technologies and applications // Automated Construction. – 2019. – Vol. 101. – P. 111–126. – https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.023

5 **Rajeshwar, R. K., Arabelli, R. R., Rajababu, D., Mahender, K.** Solar power generation system with IOT based monitoring and controlling using different sensors and protection devices to continuous power supply // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 981(3). – 032017. – https://doi.org/10.1088/1757-899X/981/3/032017

6 **Pramono, S. H., Sari, S. N., Maulana, E.** Internet-based monitoring and protection on PV smart grid system // Proceedings of 2017 International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology, SIET 2017. – 2017. – P. 448–453. – https://doi.org/10.1109/SIET.2017.8304180

7 **John, A., Varghese, R., Krishnan, S. S., Thomas, S., Swayambu, T. A., Thasneem, P.** Automation of 11 kV substation using Raspberry pi // 2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), Kollam, India. – 2017. – P. 1–5. – https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2017.8074264

8 **Shah, M. H., Khan, S., Khan, A., Khan, I., Eldin, S. M.** Sustainable energy management using the Internet of Things (IoT) // PLoS ONE. – 2023. – Vol. 6(18). – e0283754. – https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283754

9 **Trivedi, M. A., Dalvi, S., Devaiya, R., Raju, R., Modi, Y.** Transformer Protection using PLC and GSM Technology // Global Journal of Researches in Engineering: Part F : Electrical and Electronic Engineering. – 2019. – Vol. 19(F2). – pp. 23–26.

10 **Arabelli, R. R., Rajababu, D.** Transformer Optimal Protection using Internet of Things // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. – 2019. – Vol. 8(11). – P. 2169–2172. – http://doi.org/10.35940/ijitee.K2032.0981119

Поступило в редакцию 22.04.26.
Поступило с исправлениями 29.04.26.
Принято в печать 31.08.26.

*Ж. Б. Исабеков[1], *Б. Б. Исабекова[2], А. А. Шимпф[3], Л. Н. Есмаханова[4], Б. Е. Ордабаев[5]*
[1,2,3,5]Торайғыров университеті,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[4]М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті,
Қазақстан Республикасы, Тараз қ.
22.04.26 ж. баспаға түсті.
29.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЗАТТАР ИНТЕРНЕТІ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, БІР ФАЗАЛЫ ЖЕРГЕ ТҰЙЫҚТАЛУДЫ АНЫҚТАУ ӘДІСІ

Жұмыста Заттар интернеті технологиясының сипаттамасы келтірілген, бағдарламалық-аппараттық кешен жүйесінің негізгі элементтері қарастырылған. Қашықтағы құрылғылармен байланысты қамтамасыз ету технологияларына көп көңіл бөлінеді, өйткені олар жұмыс жағдайларына байланысты әр түрлі болады және жүйелерді құру ерекшеліктерін анықтайды. Диспетчерлік басқару жүйелерінде заттар интернетін қолдану мысалдары, оны қолданыстағы тарату желілерінің жабдықтарын бақылау және басқару жүйелеріне енгізу нұсқалары, сондай-ақ жаңартылатын энергия көздерімен бірлесіп жұмыс істейтін интеллектуалды тұрақты ток желілерінің бөлігі ретінде қарастырылады. Технологияларды талдау негізінде микропроцессорлық құрылғыларды қолданудың тиімділігі көрсетілген, далалық құрылғылар бағдарламаларында қорғаныс функцияларын жүзеге асырудың орындылығы, сондай-ақ жабдықты бақылау және диспетчерлік жүйелерді құру міндеттері үшін заттар интернеті технологияларын қолдану перспективасы көрсетілген.

Оқшауланған бейтарап кабельдік желілерде бір фазалы жерге тұйықталуды анықтау әдісі ұсынылған. Бұл тәсіл зақымдану кезінде пайда болатын нөлдік тізбектегі токтарды анықтау үшін магнитті басқарылатын контактілерді (қамыс қосқыштарын) қолдануға және кейіннен интернет заттары (IoT) технологиялары негізінде сымсыз байланыс арналары арқылы диспетчерлік қызметке деректерді жіберуге негізделген. Жүйеге мұндай интеграция апаттарды іздеу және жою уақытын едәуір қысқартуға мүмкіндік береді, бұл кабельдік желінің штаттық жұмыс режимін тез қалпына келтіруге ықпал етеді.

Кілтті сөздер: Интернет заттары, бір фазалы жерге тұйықталу, кабельдік желілер, магнитті басқарылатын контактілер, нөлдік реттілік тогы, бақылау

*Zh. B. Issabekov[1], *B. B. Issabekov[2], A. A. Shimpf[3], L. Yesmakhanova[4], A. B. Sagyndyk[5]*
[1,2,3,5]Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[4]M. Kh. Dulaty Taraz University,
Republic of Kazakhstan, Taraz.
Received 22.04.26.
Received in revised form 29.04.26.
Accepted for publication 31.08.26.

A METHOD FOR DETERMINING SINGLE-PHASE EARTH FAULTS USING INTERNET OF THINGS TECHNOLOGIES

The paper describes the technology of the Internet of Things, considers the main elements of the system of the software and hardware complex. The greatest attention is paid to technologies for providing communication with remote devices, since they vary most depending on operating conditions and determine the specifics of building systems. Examples of the use of the Internet of Things in dispatch control systems, options for its implementation in systems for monitoring and controlling equipment of existing distribution networks, as well as as part of intelligent DC networks operating in conjunction with renewable energy sources, are considered. Based on the technology analysis, the cost-effectiveness of using microprocessor devices is shown, the expediency of implementing protection functions in field device programs is noted, as well as the prospects for using Internet of Things technologies for monitoring equipment and building dispatching systems.

A method for identifying single-phase ground faults in cable networks with an isolated neutral is presented. The approach is based on the use of magnetically controlled contacts (reed switches) to detect zero-sequence currents that occur during damage and then transmit data to the dispatch service via wireless communication channels based on Internet of Things (IoT) technologies. This integration into the system significantly reduces the time needed to find and eliminate accidents, which helps to quickly restore the normal operation of the cable network.

Keywords: Internet of Things, single-phase earth faults, cable networks, magnetically controlled contacts, zero-sequence current, monitoring.

МРНТИ 44.39.29

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/322-339

М. С. Исатаев[1], Б. Ж. Бектибай[2], *Ж. К. Сейдулла[3], Б. Т. Амир[4], Ж. Г. Кунтубаева[5]

[1,2,3,4,5]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Республика Казахстан, г. Алматы.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8248-670X
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6411-8049
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0413-6557
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9347-8379
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8010-9510
*e-mail: Zhanibek.seidulla@kaznu.edu.kz

ВЭУ С КОАКСИАЛЬНЫМИ ВАЛАМИ И ОБГОНЯЮЩЕЙ МУФТОЙ 30° ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТАРТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

В работе представлено экспериментальное исследование вертикальной ветроэнергетической установки типа Дарье с коаксиальными валами и обгоняющей муфтой с углом зацепления 30°, направленное на повышение стартовых характеристик и устойчивости вращения при низких скоростях ветра. Предложенная конструктивная схема обеспечивает фазовое согласование вращения коаксиальных валов и одностороннюю передачу крутящего момента, что способствует улучшению самозапуска и снижению пульсаций момента.

Эксперименты провели в аэродинамическом туннеле собственной конструкции. Испытывали четырёхлопастной ротор с профилем NACA 0021 при скоростях воздушного потока 6, 7 и 8 м/с. Частоту вращения снимали лазерным бесконтактным тахометром с точностью ±1 %; каждый режим прогоняли трижды и дальше работали со средними значениями. Для чистоты сравнения рассмотрели базовую конфигурацию без углового опережения (0°) и вариант с фазовым смещением 30°.

Картина получилась вполне однозначная. Обгоняющая муфта с углом зацепления 30° даёт более интенсивный разгон ротора на промежуточных режимах, уменьшает инерционные потери между коаксиальными валами и в целом делает динамику вращения спокойнее и предсказуемее. При росте скорости воздушного потока разница между конфигурациями постепенно сглаживается – и это логично: когда ветра достаточно, установка и так выходит на режим без "подпорок". В итоге фазовое смещение показывает себя как рабочий инструмент именно для старта и низко-умеренных скоростей. Предложенную конструктивную концепцию можно использовать при разработке вертикально-осевых ВЭУ, рассчитанных на эксплуатацию в условиях слабого и умеренного ветра.

Ключевые слова: ротор Дарье; ВЭУ; коаксиальные валы; обгоняющая муфта; профиль NACA0021; стартовые характеристики.

Введение

Климатическая повестка накаляется, традиционные энергоносители дорожают и исчерпываются, а экологические требования становятся жёстче – всё это подталкивает энергетику искать рабочие решения в секторе ВИЭ [1]. Ветроэнергетика здесь – один из главных кандидатов. Но у классических ветроустановок есть неприятная привычка: при переменном или слабом ветре они не всегда держат стабильный режим и часто теряют эффективность именно тогда, когда она нужна больше всего [2].

На этом фоне вертикально-осевые ветроэнергетические установки (VAWT) снова попали в фокус [3]. У них есть ряд конструктивных плюсов, которые в поле ощущаются сразу: они не завязаны на направление ветра, компактны, шумят заметно меньше и терпимее относятся к турбулентным [4], разнонаправленным потокам – а в городской среде иначе и не бывает [5]. С появлением более доступных вычислительных моделей и аккуратных экспериментальных методик интерес к VAWT закономерно вырос [6], их всё чаще рассматривают как вариант для распределённой генерации и территорий с невысоким ветровым потенциалом [7].

Но романтика заканчивается там, где начинается аэродинамика. Массовому внедрению вертикально-осевых установок мешают вполне конкретные проблемы, и главная из них – слабый самозапуск при малых и умеренных скоростях ветра, на старте трудно сформировать устойчивый крутящий момент, и система раскачивается дольше, чем хотелось бы [8]. Дальше добавляются пульсации момента при переходе лопастей из наветренной в подветренную зону [9], динамический срыв потока, повторное взаимодействие с возмущённым следом и узкий рабочий коридор по коэффициенту быстроходности (TSR) [10]. Свою долю вносит и вертикальная компоновка: она повышает изгибающие нагрузки и нагрузку

на подшипниковые узлы, из-за чего масштабировать такие установки до больших мощностей становится заметно сложнее [11].

Поэтому сегодняшние исследования VAWT всё чаще упираются не в красивую теорию [12], а в конкретную инженерную задачу: как подтянуть конструктивную схему и аэродинамику так, чтобы установка уверенно стартовала и не трясла моментом на каждом обороте [13]. В ход идут разные подходы – гибридные конфигурации, спиральные и закрученные лопасти [14], системы изменяемого шага, а также многороторные и коаксиальные решения [15]. Общая цель у них одна: поднять пусковой момент и сделать выходной крутящий момент более ровным [16], без лишних провалов и пиков [17]. Параллельно заметно окрепли CFD-моделирование и оптимизационные методы, они точнее ловят нестационарные эффекты и помогают сокращать разрыв по эффективности между VAWT и HAWT [18], который раньше казался почти неизбежным [19].

В этой работе мы предлагаем конструктивную концепцию, которая бьёт прямо в слабое место вертикально-осевых установок – старт. Речь о VAWT с коаксиальными валами и обгоняющей муфтой с углом сцепления 30°. Коаксиальная схема вместе с механизмом обгона позволяет передавать инерционный момент между валами и удерживать согласованное угловое положение, за счёт чего самозапуск идёт быстрее, а пульсации крутящего момента на начальном этапе становятся заметно мягче. Важно, что обгоняющая муфта с углом сцепления 30° даёт эту стабилизацию без усложнения аэродинамической компоновки: железо помогает пройти самый капризный режим, не заставляя заново перекраивать ротор. В итоге установка выигрывает именно там, где ветер низкий, – и по стабильности, и по общей энергетической отдаче [20].

Материалы и методы

Испытания мы проводили в аэродинамической лаборатории на изготовленных макетах роторов. Аэродинамические характеристики исследовали в экспериментальном туннеле собственной сборки, который показан на рисунке 1. Такой стенд позволил воспроизвести управляемый воздушный поток и в одинаковых условиях сравнить работу исследуемых конфигураций.

Рисунок 1 – Общий вид аэродинамической туннели

Аэродинамический туннель мы собрали из ОСБ-плит – без экзотики, зато жёстко и предсказуемо по геометрии. Рабочий канал выполнен прямоугольным: 1250×1250 мм, а общая длина установки составляет 4100 мм. В торцевой части стоит осевой вентилятор диаметром 840 мм, который в рабочей зоне, формируя направленный воздушный поток. Противоположный торец оставили открытым – так поток свободно выходит и не создаёт лишних паразитных подпоров.

Рабочую часть разместили в центральной зоне по длинной стороне: она даёт доступ для визуального контроля и удобна для измерений. Скорость потока фиксировали цифровым анемометром UNI-T UT361, установленным в зоне устоявшегося потока в рабочей части туннеля. Вентилятор приводится трёхфазным асинхронным электродвигателем ПРАКТИК АИР100S4 У1 (номинальная мощность 3 кВт, частота вращения 1410 об/мин), что позволяет держать поток достаточно стабильным для серии повторяемых испытаний. В рамках эксперимента скорость воздушного потока варьировали в диапазоне 6–8 м/с и каждый режим фиксировали тем же анемометром. Исследуемый объект размещали непосредственно в рабочей части аэродинамического туннеля.

В работе рассматривается четырёхлопастная вертикально-осевая ветроэнергетическая установка типа Дарье. Ротор включает четыре лопасти, равномерно распределённые вокруг центрального вала, показанной на рисунке 2.

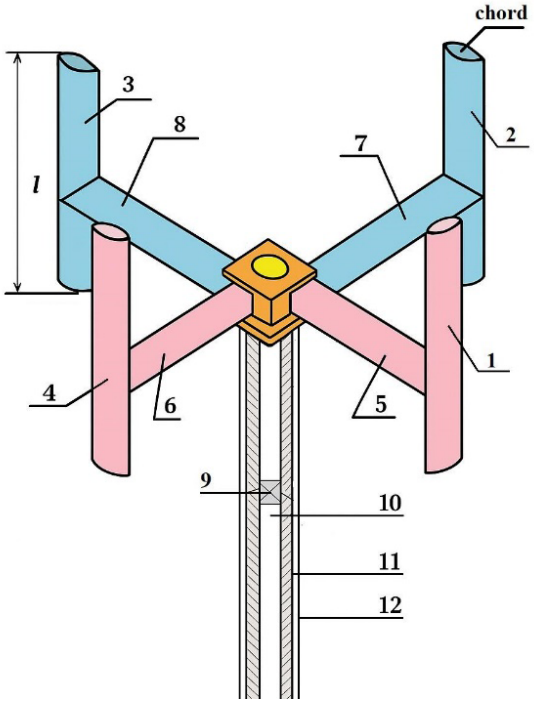


Рисунок 2 – Конструкция ветроэнергетической установки:
1–4 – лопасти; 5–8 – полумахи установки с профилем NACA0021;
9 – опорные подшипники; 10 – центральный вал вращения;
11 – наружный вал вращения; 12 – корпус

На рисунке 3 показан общий вид макета вертикально-осевой ветроэнергетической установки. Мы собрали конструкцию в виде вертикального ротора, установленного на жёстком металлическом основании: оно держит систему устойчиво и заметно снижает вибрации во время испытаний. Макет разместили строго по центральной оси туннеля, чтобы ротор обтекался равномерно и результаты аэродинамических измерений не искажались перекосом потока. В качестве исследуемого профиля выбрали симметричный NACA 0021. Лопасти изготовили из пластика методом 3D-печати, что позволило точно выдержать геометрию и получить повторяемую форму всех элементов.

Рисунок 3 – Макет ветроэнергетической установки
в рабочей части аэродинамической туннели

Роторная система включает две пары лопастей, связанные через подшипниковые узлы. Такая схема, с одной стороны, обеспечивает согласованное вращение всей системы, а с другой – даёт возможность отдельно анализировать аэродинамическое поведение каждой пары и точнее отслеживать их взаимное влияние.

На рисунке 4 показана конструкция обгоняющей муфты с углом зацепления 30°, установленной в центральной части роторного узла. Муфта смонтирована на валу и работает как механизм односторонней передачи крутящего момента: при достижении заданного углового положения она передаёт вращение от одного коаксиального вала другому. За счёт этого удаётся согласовать работу валов, снизить потери на переходных режимах и сделать начальную стадию вращения более устойчивой.

Рисунок 4 – Обгоняющая муфта 30°

Конструкция обеспечивает одностороннюю передачу момента и свободный ход при относительном опережении одного из валов, что способствует улучшению стартовых характеристик турбины и синхронизации вращения коаксиальных валов. Геометрические размеры стенда подбирались под размеры рабочей части аэродинамической туннели (таблица 1).

Таблица 1 – Основные размеры ветроколеса.

Параметры	Значение
Диаметр ветрового колеса	840 мм
Высота вала	500 мм
Количество лопастей	4
Хорда лопастей	100 мм
Высота лопасти	700 мм
Длина маха	340 мм

Частоту вращения роторов измеряли лазерным бесконтактным тахометром, показанным на рисунке 5; точность прибора составляла ±1 %.

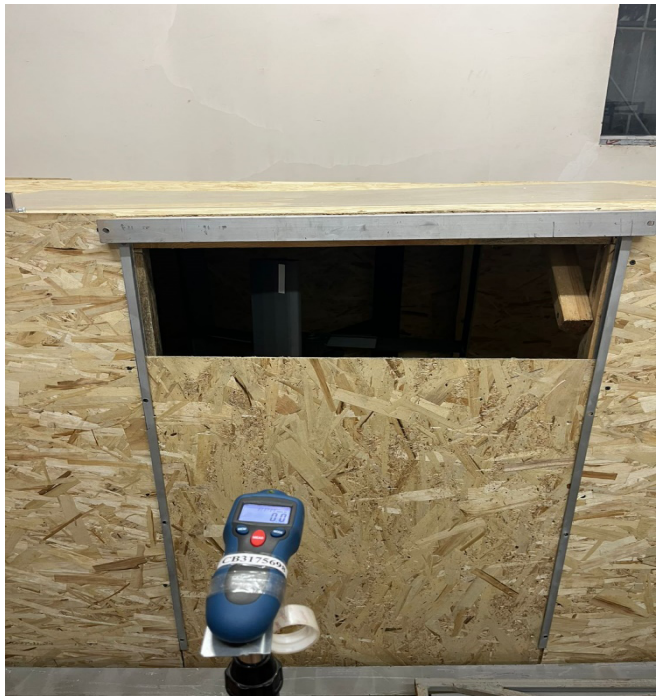


Рисунок 5 – Лазерный бесконтактный тахометр AT-8

Лазерный бесконтактный тахометр измеряет частоту вращения по-простому и надёжному принципу – он считает отражённые импульсы света. На вращающийся элемент (вал или лопасть) мы наносили отражающую метку, после чего прибор направлял на неё узкий лазерный луч. Как только метка проходила через зону излучения, свет возвращался на фотодатчик тахометра и формировал импульс. Дальше всё делает электроника: фиксирует число импульсов за заданное время и автоматически переводит его в частоту вращения, об/мин.

Главный плюс такого подхода – никакого контакта с ротором. Мы ничего не прижимаем, не тормозим и не подсаживаем систему дополнительной нагрузкой, поэтому измерение не вмешивается в динамику вращения и даёт корректные данные.

Каждый режим измеряли трижды, а для последующего анализа брали среднее значение. Суммарная экспериментальная погрешность при определении аэродинамических характеристик не превышала ±1,2 %.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные данные для каждого режима сделали три повторения, затем усреднили результаты. После этого данные собрали в понятные сравнительные зависимости – как меняется частота вращения ротора при изменении управляющих параметров стенда. Такой формат убирает случайный шум, уменьшает влияние разовых отклонений и даёт нормальную базу для анализа динамики установки, без подгонки и догадок.

На рисунке 6 показана зависимость частоты вращения ротора (RPM) от режима работы вентилятора при фиксированной скорости воздушного потока 6 м/с. График сравнивает две конфигурации: базовую (угол 0°) и модифицированную с угловым опережением 30°. Эти данные позволяют напрямую оценить, как фазовое смещение влияет на разгонные характеристики и насколько устойчиво ротор держит вращение в рассматриваемом диапазоне режимов.

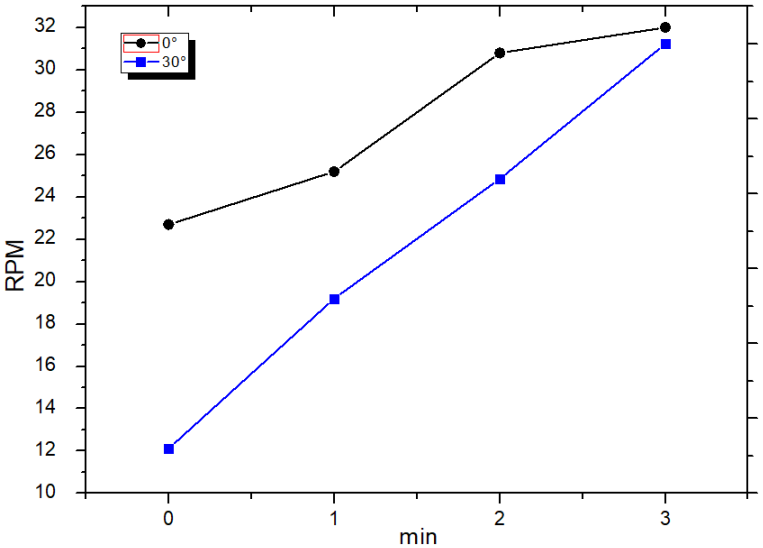


Рисунок 6 – Частота вращения вентилятора 25 об/мин при скорости воздушного потока 6 м/с

Анализ показывает простую картину: по мере увеличения режима работы вентилятора (ось абсцисс) частота вращения растёт у обеих конфигураций. При этом вариант с углом 0° во всём диапазоне держит чуть более высокие обороты. Но важнее другое – разрыв между кривыми постепенно схлопывается. Если на начальном режиме разница составляет порядка 10 об/мин, то на максимальном она уменьшается до 1–2 об/мин. И это уже намекает на динамику: конфигурация с углом 30° набирает обороты интенсивнее, то есть фазовое смещение помогает ротору быстрее разгоняться и увереннее выходить на режим.

На рисунке 7 показана зависимость частоты вращения ротора (RPM) при частоте вращения вентилятора 26 об/мин и скорости воздушного потока 7 м/с для двух конфигураций – без углового опережения (0°) и с углом 30°.

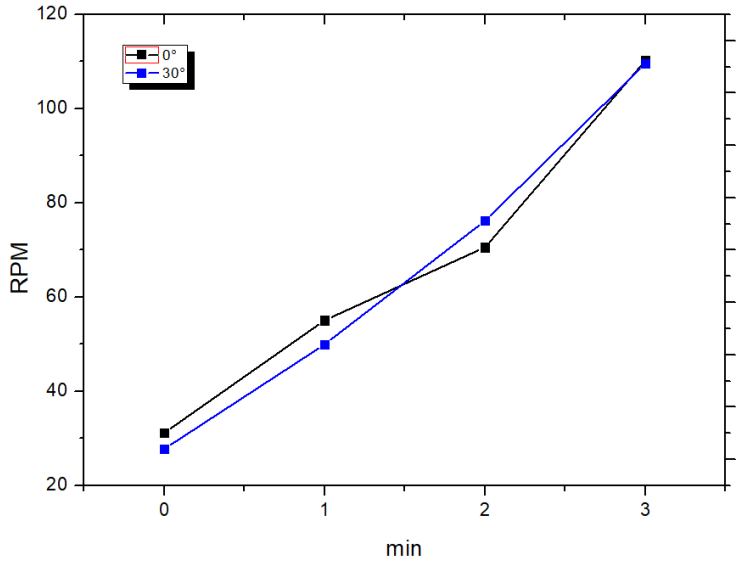


Рисунок 7 – Частота вращения вентилятора 26 об/мин при скорости воздушного потока 7 м/с

График показывает уверенный рост частоты вращения при увеличении режима работы для обеих конфигураций. На старте (нулевая точка по оси абсцисс) базовый вариант 0° даёт немного более высокие обороты, чем конфигурация с углом 30°. Дальше картина меняется: при увеличении режима именно вариант 30° набирает обороты заметно быстрее. Уже на

среднем участке (примерно 2 мин по оси абсцисс) он выходит вперёд, а к максимальному режиму обе кривые практически сходятся – около 110 об/мин.

Это означает, что угловое опережение 30° работает как “ускоритель” разгона: помогает ротору быстрее выходить на режим и сглаживает различия в динамике при более высоких скоростях потока. В итоге вращение становится стабильнее, а поведение установки – предсказуемее.

На рисунке 8 представлена зависимость частоты вращения ротора (RPM) при частоте вращения вентилятора 27 об/мин и скорости воздушного потока 8 м/с для двух конфигураций: базовой (0°) и с углом опережения 30°.

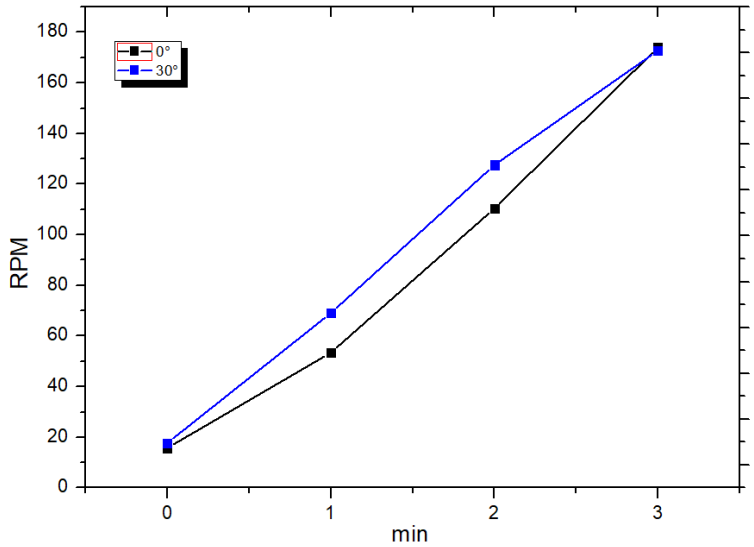


Рисунок 8 – Частота вращения вентилятора 27 об/мин при скорости воздушного потока 8 м/с

Из График показывает почти линейный рост частоты вращения по мере увеличения режима работы – и для базовой схемы, и для варианта с углом 30°. На старте разница между ними минимальна, фактически в пределах рабочего разброса. Но в зоне 1–2 мин по оси абсцисс начинает проявляться характерная деталь: конфигурация с угловым смещением 30° набирает обороты заметно бодрее, чем базовая. На максимальном режиме кривые снова сходятся – частота вращения практически совпадает и достигает порядка 174 об/мин. В итоге получается логичный вывод: смещение 30° даёт выигрыш именно на промежуточных режимах разгона. Оно помогает

ротору быстрее выходить на рабочие обороты, уменьшает инерционные потери между элементами системы и в целом улучшает динамику установки при более высоких скоростях воздушного потока.

Информация о финансировании

Данная работа была выполнена в рамках конкурса на грантовое финансирование научных и (или) научно-технических проектов на 2024–2026 годы, проводимого Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан. Номер проекта: AP23487726.

Выводы

Проведённые эксперименты показали, что коаксиальная схема с обгоняющей муфтой и углом зацепления 30° – не концепт на бумаге, а реально работающий способ подтянуть стартовые характеристики вертикально-осевой ветроэнергетической установки. По зависимостям частоты вращения видно, что угловое опережение помогает ротору активнее разгоняться на промежуточных режимах и постепенно сокращает разницу между конфигурациями по мере роста скорости потока. Иными словами, фазовое смещение даёт плюс именно там, где старт обычно самый капризный, – на этапе начального разгона и выхода на устойчивое вращение. При увеличении скорости потока до 6–8 м/с частота вращения обеих схем растёт стабильно, но вариант с углом 30° показывает более заметный прирост оборотов в переходных режимах. Здесь хорошо “срабатывает” механика: обгоняющая муфта обеспечивает одностороннюю передачу момента и частично компенсирует инерционные потери между коаксиальными валами. В результате улучшается самозапуск и сглаживаются пульсации крутящего момента, что напрямую влияет на устойчивость работы установки. Полученные результаты подтверждают целесообразность дальнейшего развития коаксиальных компоновок с механизмами фазового согласования для повышения энергетической эффективности VAWT при низких и умеренных скоростях ветра. Предложенная методика экспериментальной оценки может служить основой для последующей оптимизации геометрических и кинематических параметров установки, а также для масштабирования конструкции до полупромышленных образцов.

REFERENCES

1 **Backwell, B.** GWEC’s GlobalWind Report 2024. 2024. [Electronic resource]. – Available online: https://www.gwec.net/gwec-news/wind-industryinstalls-record-capacity-in-2024-despite-policy-instability

2 **Kumar, Y., Ringenberg, J., Depuru, S., Devabhaktuni, V.K., Lee,W., Nikolaidis, E., Andersen, B., Afjeh, A.** Wind energy : Trends and enabling technologies. Renew. Sustain. Energy Rev. 2016, 53, 209–224.

3 **Li, Y., Zheng, Y., Zhao, S., Fenf, F., Li, J., Wang, N., Bai, R.** A review on aerodynamic characteristics of straight-bladed vertical axis wind turbines. Acta Aerodyn. Sin. 2017, 35, 368–382.

4 **Barnes, A., Marshall-Cross, D., Hughes, B. R.** Towards a standard approach for future Vertical Axis Wind Turbine aerodynamics research and development. Renew. Sustain. Energy Rev. 2021, 148, 111221.

5 **Rezaei, F., Paraschivoiu, M.** Computational study of the effect of building height on the performance of roof-mounted VAWT // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. –2023. –Vol. 241. –Art. 105540. – https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105540

6 **Randall, R., Chen, C., Ageze, M. B., Tigabu, M. T.** Perspectives of Vertical Axis Wind Turbines in Cluster Configurations // Fluid Dynamics and Materials Processing. –2024. –Vol. 20, No. 12. –P. 2657–2691. – https://doi.org/10.32604/fdmp.2024.058169

7 **Jin, G., Zong, Z., Jiang, Y., Zou, L.** Aerodynamic analysis of side-by-side placed twin vertical-axis wind turbines // Ocean Engineering. – 2020. – Vol. 209. – Art. 107296. – https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107296

8 **Le Fouest, S., Mulleners, K.** The dynamic stall dilemma for vertical-axis wind turbines // Renewable Energy. –2022. –Vol. 198. –P. 505–520. – https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.071

9 **Isataev, M., Manatbayev, R., Seydulla, Z., Kalassov, N., Yershina, A., Baizhuma, Z.** Experimental and computational study of the aerodynamic characteristics of a Darrieus rotor with asymmetrical blades to increase turbine efficiency under low wind velocity conditions // Applied System Innovation. – 2025. – Vol. 8, No. 2. – Art. 49. – https://doi.org/10.3390/asi8020049

10 **Dai, J., Li, M., Chen, H., He, T., Zhang, F.** Progress and challenges on blade load research of large-scale wind turbines // Renewable Energy. –2022. –Vol. 196. – P. 482–496. – https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.017

11 **Yebarat, A., Tayebi, A., Shekari, Y.** Numerical investigation of the torque produced by Darrieus vertical axis wind turbine in dusty flow // Renewable Energy. – 2025. – Vol. 244. – Art. 122731. – https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122731

12 **Gallorini, F., Barelli, L.** Design and prototyping of miniature wind turbine and power generation section for the exploitation of wind generated by vehicle movement in road tunnels // Energy. –2024. –Vol. 305. – Art. 132308. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132308

13 **Talamalek, A., Runacres, M. C., De Troyer, T.** Experimental investigation of the wake replenishment mechanisms of paired counter-rotating vertical-axis wind turbines // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2024. – Vol. 252. – Art. 105830. – https://doi.org/10.1016/j.jweia.2024.105830

14 **Rahmatian, M. A., Khaksar, S., Tari, P. H., Karbasian, H. R.** Optimizing duct geometry for micro-scale VAWTs: Exploring aerodynamics and aeroacoustics with URANS and DDES models // Energy. –2024. –Vol. 313. – Art. 134043. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134043

15 **Abdel-Razak, M. H., Emam, M., Okawara, S., Hassan, H.** Power performance enhancement for a three-turbine cluster of two-stage Savonius rotors using Taguchi approach // Energy. –2024. –Vol. 308. –Art. 132903. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132903

16 **Gupta, A., Abderrahmane, H. A., Janajreh, I.** Flow analysis and sensitivity study of vertical-axis wind turbine under variable pitching // Applied Energy. – 2024. – Vol. 358. – Art. 122648. – https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122648

17 **Zhang, Q., Bashir, M., Miao, W., Liu, Q., Li, C., Yue, M., Wang, P.** Aerodynamic analysis of a novel pitch control strategy and parameter combination for vertical axis wind turbines // Renewable Energy. –2023. –Vol. 216. – Art. 119089. – https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119089

18 **Chen, Y., Zhang, D., Li, X., Peng, Y., Zhang, X., Han, Z., Cao, Y., Dong, Z.** Surrogate models for twin-VAWT performance based on Kriging and artificial neural networks // Ocean Engineering. –2023. –Vol. 273. –Art. 113947. – https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113947

19 **Sun, Y., Qian, Y., Gao, Y., Wang, T., Wang, L.** Stall control on the wind turbine airfoil via the single and dual-channel of combining bowing and suction technique // Energy. –2024. –Vol. 290. –Art. 130224. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130224

20 **Исатаев, М. С., Манатбаев, Р. К., Бектибай, Б. Ж., Әмір, Б. Т., Байжума, Ж. Е., Қаласов, Н. Б., Сейдулла, Ж. Қ.** Ветряная Турбина: патент на полезную модель № 10579 Респ. Казахстан; опубл. 11.02.2025; – Астана : Национальный институт интеллектуальной собственности.

REFERENCES

1 **Backwell, B.** GWEC's GlobalWind Report 2024. 2024. [Electronic resource] – Available online: https://www.gwec.net/gwec-news/wind-industryinstalls-record-capacity-in-2024-despite-policy-instability

2 **Kumar, Y., Ringenberg, J., Depuru, S., Devabhaktuni, V.K., Lee,W., Nikolaidis, E., Andersen, B., Afjeh, A.** Wind energy : Trends and enabling technologies. Renew. Sustain. Energy Rev. 2016, 53, 209–224.

3 **Li, Y., Zheng, Y., Zhao, S., Fenf, F., Li, J., Wang, N., Bai, R.** A review on aerodynamic characteristics of straight-bladed vertical axis wind turbines. Acta Aerodyn. Sin. 2017, 35, 368–382.

4 **Barnes, A., Marshall-Cross, D., Hughes, B. R.** Towards a standard approach for future Vertical Axis Wind Turbine aerodynamics research and development. Renew. Sustain. Energy Rev. 2021, 148, 111221.

5 **Rezaei, F., Paraschivoiu, M.** Computational study of the effect of building height on the performance of roof-mounted VAWT // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. –2023. –Vol. 241. –Art. 105540. – https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105540

6 **Randall, R., Chen, C., Ageze, M. B., Tigabu, M. T.** Perspectives of Vertical Axis Wind Turbines in Cluster Configurations // Fluid Dynamics and Materials Processing. –2024. –Vol. 20, No. 12. –P. 2657–2691. – https://doi.org/10.32604/fdmp.2024.058169

7 **Jin, G., Zong, Z., Jiang, Y., Zou, L.** Aerodynamic analysis of side-by-side placed twin vertical-axis wind turbines // Ocean Engineering. – 2020. – Vol. 209. – Art. 107296. – https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107296

8 **Le Fouest, S., Mulleners, K.** The dynamic stall dilemma for vertical-axis wind turbines // Renewable Energy. –2022. –Vol. 198. –P. 505–520. – https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.071

9 **Isataev, M., Manatbayev, R., Seydulla, Z., Kalassov, N., Yershina, A., Baizhuma, Z.** Experimental and computational study of the aerodynamic characteristics of a Darrieus rotor with asymmetrical blades to increase turbine efficiency under low wind velocity conditions // Applied System Innovation. – 2025. – Vol. 8, No. 2. – Art. 49. – https://doi.org/10.3390/asi8020049

10 **Dai, J., Li, M., Chen, H., He, T., Zhang, F.** Progress and challenges on blade load research of large-scale wind turbines // Renewable Energy. –2022. – Vol. 196. – P. 482–496. – https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.017

11 **Yebarat, A., Tayebi, A., Shekari, Y.** Numerical investigation of the torque produced by Darrieus vertical axis wind turbine in dusty flow // Renewable Energy. – 2025. – Vol. 244. – Art. 122731. – https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122731

12 **Gallorini, F., Barelli, L.** Design and prototyping of miniature wind turbine and power generation section for the exploitation of wind generated by vehicle movement in road tunnels // Energy. –2024. –Vol. 305. – Art. 132308. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132308

13 **Talamalek, A., Runacres, M. C., De Troyer, T.** Experimental investigation of the wake replenishment mechanisms of paired counter-rotating vertical-axis wind turbines // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2024. – Vol. 252. – Art. 105830. – https://doi.org/10.1016/j.jweia.2024.105830

14 **Rahmatian, M. A., Khaksar, S., Tari, P. H., Karbasian, H. R.** Optimizing duct geometry for micro-scale VAWTs: Exploring aerodynamics and aeroacoustics with URANS and DDES models // Energy. –2024. –Vol. 313. –Art. 134043. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134043

15 **Abdel-Razak, M. H., Emam, M., Okawara, S., Hassan, H.** Power performance enhancement for a three-turbine cluster of two-stage Savonius rotors using Taguchi approach // Energy. –2024. –Vol. 308. –Art. 132903. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132903

16 **Gupta, A., Abderrahmane, H. A., Janajreh, I.** Flow analysis and sensitivity study of vertical-axis wind turbine under variable pitching // Applied Energy. – 2024. – Vol. 358. – Art. 122648. – https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122648

17 **Zhang, Q., Bashir, M., Miao, W., Liu, Q., Li, C., Yue, M., Wang, P.** Aerodynamic analysis of a novel pitch control strategy and parameter combination for vertical axis wind turbines // Renewable Energy. –2023. –Vol. 216. – Art. 119089. – https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119089

18 **Chen, Y., Zhang, D., Li, X., Peng, Y., Zhang, X., Han, Z., Cao, Y., Dong, Z.** Surrogate models for twin-VAWT performance based on Kriging and artificial neural networks // Ocean Engineering. –2023. –Vol. 273. –Art. 113947. – https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113947

19 **Sun, Y., Qian, Y., Gao, Y., Wang, T., Wang, L.** Stall control on the wind turbine airfoil via the single and dual-channel of combining bowing and suction technique // Energy. –2024. –Vol. 290. –Art. 130224. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130224

20 **Isataev, M. S., Manatbaev, R. K., Bektibaj, B. Zh., Әmir, B. T., Bajzhuma, Zh. E., Қalasov, N. B., Sejdulla, Zh. Қ.** Vetryanaya Turbina: patent na poleznuyu model` № 10579 Resp. Kazaxstan; opubl. 11.02.2025 [WIND TURBINE: utility model patent No. 10579 Rep. Kazakhstan]; published on 02/11/2025; –Astana : National Institute of Intellectual Property.

Поступило в редакцию 02.04.26.
Поступило с исправлениями 24.04.26.
Принято в печать 02.09.26.

*М. С. Исатаев[1], Б. Ж. Бектібай[2], *Ж. Қ. Сейдулла[3], Б. Т. Әмір[4], Ж. Ғ. Кунтубаева[5]*
[1,2,3,4,5]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
02.04.26 ж. баспаға түсті.
24.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
02.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

КОАКСИАЛДЫ БІЛІКТЕРІ ЖӘНЕ ІСКЕ ҚОСУ ӨНІМДІЛІГІН ЖАҚСАРТУ ҮШІН 30° ОЗЫП КЕТУ МУФТАСЫ БАР ТІК ЖЕЛ ТУРБИНАСЫ

Бұл жұмыста төмен жылдамдықтағы жел жағдайында іске қосу сипаттамаларын және айналу тұрақтылығын арттыруға бағытталған коаксиалды біліктері және 30° ілінісу бұрышы бар обгоняушы муфтамен жабдықталған Дарье типті тік осьті жел энергетикалық қондырғысының эксперименттік зерттеуі ұсынылған. Ұсынылған конструктивтік сызба коаксиалды біліктердің айналуын фазалық үйлестіруді және айналу моментін біржақты беруді қамтамасыз етеді, бұл өздігінен іске қосылу қабілетін жақсартып, момент пульсациясын азайтады.

Эксперименттік зерттеулер өзіміз құрастырған аэродинамикалық туннельде жүргізілді. Сынақтар NACA0021 профилі бар төрт қалақты ротор үшін ауа ағынының 6, 7 және 8 м/с жылдамдықтар диапазонында орындалды. Айналу жиілігі ±1 % дәлдікке ие лазерлік жанаспайтын тахометр арқылы өлшенді, әр режим үш рет қайталанды. Негізгі конфигурация (0°) мен 30° бұрыштық ілгерілеуі бар нұсқаға салыстырмалы талдау жүргізілді.

Алынған нәтижелер 30° обгоняушы муфтаны қолдану аралық жұмыс режимдерінде ротордың қарқынды үдеуін қамтамасыз ететінін, коаксиалды біліктер арасындағы инерциялық шығындарды азайтатынын және айналу динамикасын тұрақтандыратынын көрсетті. Ауа ағыны жылдамдығы артқан сайын конфигурациялар арасындағы айырмашылық азаяды, бұл фазалық ығыстырудың іске қосу сипаттамаларына оң әсерін растайды. Ұсынылған конструктивтік шешім төмен және орташа жел жылдамдықтарында жұмыс істеуге бағытталған тік осьті жел энергетикалық қондырғыларын әзірлеуде қолданылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: Дарье роторы; ЖЭУ; коаксиалды біліктер; басып озу муфтасы; NACA0021 профилі; старттық сипаттамалары.

*M. S. Isataev[1], B. Zh. Bektibay[2], *Zh. K. Seydulla[3], B. T. Amir[4], Zh. G. Kuntubayeva[5]*
[1,2,3,4,5]Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 02.04.26.
Received in revised form 24.04.26.
Accepted for publication 02.09.26.

VERTICAL AXIS WIND TURBINE WITH COAXIAL SHAFTS AND A 30° OVERRUNNING CLUTCH FOR ENHANCED START-UP PERFORMANCE

This paper presents an experimental study of a Darrieus-type vertical-axis wind turbine with coaxial shafts and a 30° overrunning clutch, aimed at improving start-up performance and rotational stability at low wind speeds. The proposed design ensures phase synchronization between the coaxial shafts and one-way torque transmission, which enhances self-starting capability and reduces torque fluctuations.

The experimental investigations were carried out in a self-constructed wind tunnel. Tests were performed on a four-bladed rotor equipped with a NACA0021 airfoil profile at airflow velocities of 6, 7, and 8 m/s. The rotational speed was measured using a laser non-contact tachometer with an accuracy of ±1 %, with each operating condition repeated three times. A comparative analysis was conducted between the baseline configuration (0°) and the modified configuration with a 30° phase lead.

The results demonstrate that the application of a 30° overrunning clutch provides a more intensive rotor acceleration in intermediate operating modes, reduces inertial losses between the coaxial shafts, and improves rotational stability. As the airflow velocity increases, the difference between the configurations decreases, confirming the positive effect of phase shifting on start-up characteristics. The proposed design concept can be applied in the development of vertical-axis wind turbines intended for operation under low and moderate wind speed conditions.

Keywords: Darier rotor; wind turbine; coaxial shafts; overrunning clutch; NACA0021 profile; starting characteristics.

SRSTI 50.01.81
https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/340-352

***I. M. Kazambaev[1], A. D. Mekhtiyev[2],**
U. K. Zhalmagambetova[3], N. N. Kylyshkozha[4]*
[1,2]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[1]Astana IT University,
Republic of Kazakhstan, Astana;
[2] Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[3]Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar;
[4]University of Padua,
Italian Republic, Veneto.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0850-7490
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2633-3976
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2261-2222
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4340-178X
*e-mail: ilyaskazambayev@gmail.com

DEVELOPMENT OF A MODEL OF A FIBER-OPTIC MONITORING SYSTEM

Currently, due to the increased demand for electricity, all components of the energy supply system play an important role in the industry of the Republic of Kazakhstan. This article discusses the main solutions for monitoring the technical condition of a power cable. One of the most accurate integrity monitoring solutions is a fiber-optic monitoring system based on a reflectometer. The purpose of this work is to develop a model of an OTDR-based fiber-optic system. The initial data for the simulation was set, and the main physical parameters were determined. Mathematical expressions were formalized for the main events, namely vibration, stretching, bending, overheating, joint defects, shock effects and mechanical damage. In order to achieve the reliability of the results, white Gaussian noise and speckle noise were additionally introduced. During the implementation, several methods for filtering the optical signal were considered and compared. Among all the proposed methods, the Wavelet method and the method based on the decomposition of a function into a Fourier series with further integration are the most effective. As a result, it was revealed that stretching, heating, and compression of the optical fiber are insignificant events. In turn, the developed program allows you to scale the signal to study phenomena in order to increase sensitivity.

Keywords: mathematical model, fiber-optic sensor, OTDR, monitoring system, power cable.

Introduction

At present, due to the growth of electricity consumption and the increased demand of consumers of the first category, monitoring the integrity and condition of power systems is becoming the most important, due to the need to provide reliable measurements for effective decision-making [1]. Relay protection currently plays an important role in preventing the spread of damage by localizing it [2]. However, the provision of high-precision monitoring of the state of objects to predict their failure and timely warning of possible intentional damage increases the cost of the solution several times [3]. One of the main areas is fiber-optic systems for monitoring the technical condition, both point for the installations themselves and distributed, most often used for power cables [4]. It is worth noting that power cables are not only prone to damage, but also to vandalism [5]. Moreover, damage to this element of power supply, thus disconnecting important components of the power system. Therefore, to ensure that the integrity of the power cable is maintained, it is necessary to build an optical fiber solution that allows you to determine the exact location of the impact. For example, [6] offers a non-volatile monitoring system that monitors the state of the power cable by partial discharges in the connections. The method is based on the developed algorithm for simplified phase-resolved analysis of partial discharges, which differs from the traditional one in the absence of a network phase synchronization sensor. This approach provides low power consumption and simplified hardware implementation. However, due to the decrease in the complexity of the system, there is a decrease in accuracy in comparison with PRPD systems. Another method with greater sensitivity and noise reduction is the use of the Mach-Zender interferometer and the slime mold algorithm combined with the signal decomposition method [7]. The advantages of this approach are increased immunity to noise and high accuracy of isolation of frequency components. The disadvantages are the need to set parameters in advance, namely the number of modes and the penalty coefficient.

In turn, the most popular methods are based on the use of reflectometers. For example, [8] proposes a method for observing partial discharges using a coherent optical time domain reflectometer (COTDR). In order to implement it, a hardware improvement of the scheme was proposed using a two-stage approach. The main advantages are a long monitoring range, distributed control along the entire length

of the optical cable, and a reduction in false alarms. The disadvantages are the high cost and complexity of the system, the large amount of data and sensitivity to external vibrations. Another approach involves the use of a phase-sensitive reflectometer (P-OTDR) [9]. The system has been improved in hardware by adding a Polarization Compensation Module (PCM) to improve measurement stability. The advantages of the method are high localization accuracy, continuous monitoring, increased stability and reliability of measurements. The main disadvantages are the high complexity and cost of the solution, the need for accurate installation and calibration. Another example is the solution [10], which is a passive optical network (PON) monitoring technology. The method is based on the application of a unique identification frequency generated by a piezoelectric transducer at the end of the branch. This solution features fast identification, no need to install new fiber, and reduced inter-branch interference. Despite this, the proposed method is expensive, as well as the presence of a limited number of unique frequencies.

In general, the use of phase-sensitive reflectometer techniques is an expensive solution. At the same time, not all technologies allow you to determine the nature of impacts. Currently, the presence of artificial intelligence makes it possible to eliminate noise in the signal, as well as classify, reconstruct and make a decision. Among these are [11], which uses a convolutional neural network (CNN) to improve the accuracy of measurement and error correction, the solution from [12] uses CNN to classify events.

Moreover, in order to develop practical solutions, it is necessary to develop a fundamental model based on the main analytical tools

Materials and methods

The main goal of the study is to develop a model of a fiber-optic system to determine the impact of various events on the signal in order to further classify them. Therefore, first of all, it is necessary to specify the initial data, namely the characteristics of the optical cable (Table 1)

Table 1 – Initial data for the design of the system

Parameter	**Significance**
Wavelength	850 nm
Core Radius	4.5 μm
Refractive Index of Core	1.45
Refractive Index of Shell	1.445
Optical Cable Length	6000 m
Laser Power	5 mW

Next, you need to define the basic expressions to model the signal to be measured:

$$\begin{cases} E(x,\ y) = \exp\left[-\left(\dfrac{r}{w_{eff}}\right)^2\right]; \\ r = \sqrt{x^2 + y^2}; \\ w_{eff} = 0.65 \cdot a_{core} \end{cases} \quad (1)$$

where r is the radius of the cross-section; WEFF is the effective radius of the mode field, a_{core} is the radius of the core.

Then, given the expression for the light wave in the optical cable [x]:

$$P(z) = P_0 - \alpha z + \sum_{i=1}^{N_r} R_i \delta(z - z_i) - \sum_{j=1}^{N_r} L_j H(z - z_i) + n(z) \quad (2)$$

where P_0 is the laser power, α is the attenuation coefficient, z is the longitudinal length of the optical cable, R_i is the reflecting events, N_r is the number of events, L_i is the reflecting events, N_l is the number of connectors, *δ(z-zi)* is the Dirac function, *H(z-zi)* is a Heaviside function.

It is possible to determine what losses will be in the optical cable.

In the future, mathematical expressions are used to simulate events:

– for reflection from the connector

$$P_{i+1}(z) = \zeta P_i \quad (3)$$

where P_i is the power at the input to the connector, ζ is the refractive ratio coefficient;

– for vibration

$$V(z) = 1 + A_v \sin\left(2\pi f_v \frac{10z}{L}\right) \quad (4)$$

where A_v is the amplitude of vibration oscillations, L is the length of the section, f_v is the frequency of vibrations

– for stretching

$$\begin{cases} w' = \rho w_{eff}, \\ E_s(x, y) = \exp\left[-\left(\dfrac{r}{w'}\right)^2\right], \end{cases} \quad (5)$$

where *w'* is the effective radius of the mode field in tension, ρ is the tensile coefficient;

– for bending

$$\begin{cases} E_s(x,y) = \exp\left[-\left(\dfrac{\sqrt{(x-\Delta x)^2 + y^2}}{w_{eff}}\right)^2\right] \\ \Delta x = 0.6a_{core} \end{cases} \quad (6)$$

– for overheating

$$\begin{cases} T(z) = T_0 + \Delta T \sin\left(\dfrac{2\pi z}{L}\right), \\ n(T) = n_0 + \alpha_T \Delta T, \\ \alpha_T = 10^{-5}, \\ z_T = z(1+\gamma\Delta T), \\ \gamma = 5\cdot 10^7, \end{cases} \quad (7)$$

where α is the thermo-optical coefficient, γ is the coefficient of thermal expansion;

– for poor adhesion

$$\begin{cases} P(z_i^+) = 0.6P(z_i^-), \\ P(z) = P(z_i^+)e^{-\beta(z-z_i)}, \end{cases} \quad (8)$$

where $P(z_i^+)$ is the power after the jump, $P(z_i^-)$ is the power before the jump, β is the attenuation coefficient;

– for a strong impact

$$I' = 0.5I \exp\left[-\left(\frac{r}{2.5a_{core}}\right)^2\right], \quad (9)$$

where I is the intensity of the optical signal;

– for chipping

$$\begin{cases} C = \exp\left[-\left(\dfrac{r}{1.5a_{core}}\right)^2\right], \\ I'' = I(1-0.6C), \end{cases} \quad (10)$$

where I is the intensity of the optical signal.

In this way, various events can be simulated based on the above expressions and source data.

Results and discussion

As a result of the simulation, it is possible to track the behavior of the light wave to create a practical solution using artificial intelligence, both to determine the physical parameters of the impact and to classify phenomena. Moreover, additive white Gaussian noise and speckle noise [x+1] were used to generate noise. Figure 1 shows a three-dimensional image of an optical fiber with an intensity display.

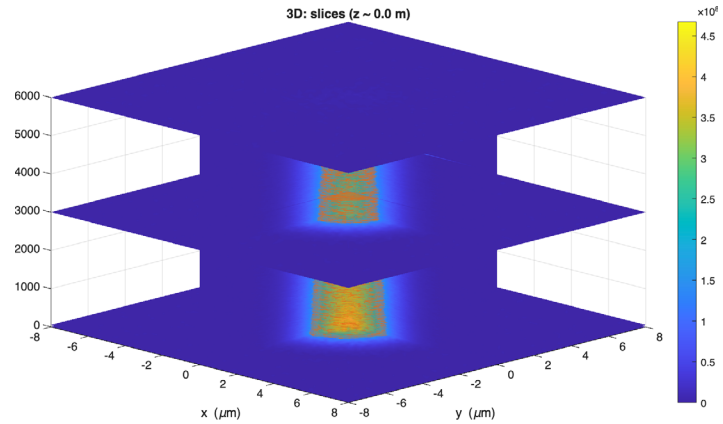


Figure 1 – Three-dimensional image of optical signal propagation

The presence of noise in the signal is indicated by slight oscillations, which can be seen in Figure 2. At the same time, strong impacts can be seen on the three-dimensional representation of the signal.

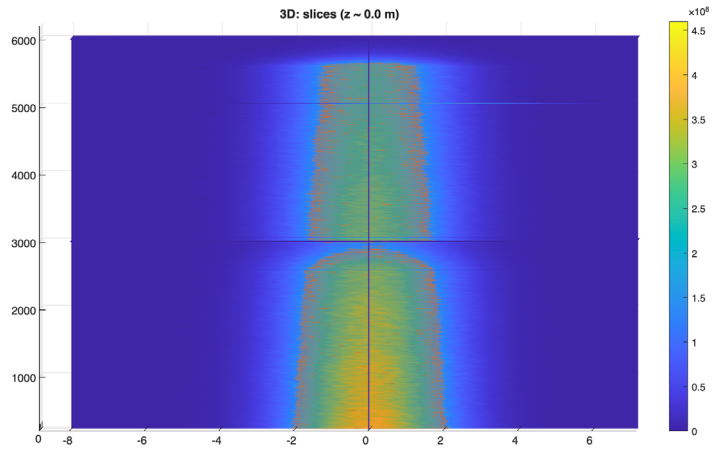


Figure 2 – Transverse intensity graph relative to z and y

The effects on the optical cable are often pronounced, however, it is worth noting that a stronger reflection occurs when bending or breaking.

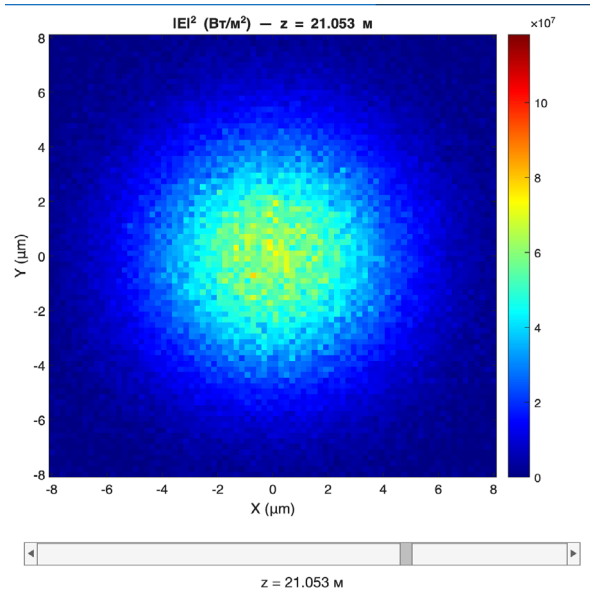


Figure 3 – Transverse intensity in x and y

By analyzing a mathematical model, a clear classification can only be achieved if the signal is filtered accurately, since even a slight noise can be superimposed on a minor event, preventing the prediction of a possible failure. For example, Figure 4 shows a reflectogram with a number of different physical events.

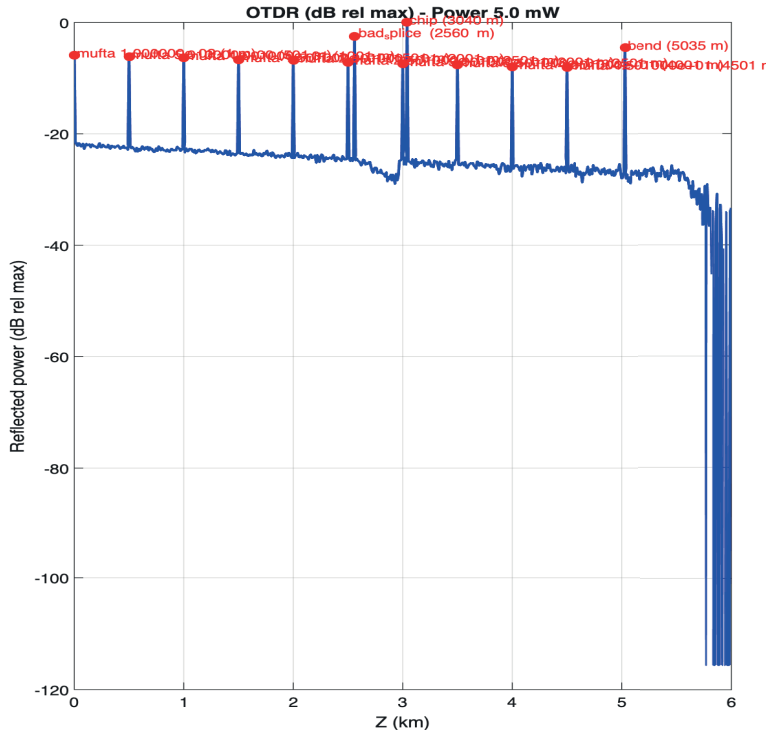


Figure 4 – A reflectogram with events

Moreover, the most common are connectors, represented as mufta, and alternating every 500 m, imitating an optical cable with a length of 500 m. Other events, namely overheating, stretching, vibration, are almost impossible to determine. On the other hand, the inflection event is distinguished relative to the connectors, but in order to determine accurately, it is necessary to introduce a flexible and sensitive mathematical apparatus with a combined setting, namely manual and automatic, which allows you to first be determined by an operator or a specialist.

Using standard methods of signal denoising, it is possible to clearly distinguish the boundaries between events and thus increase the sensitivity of the system and the accuracy of both measurement and classification (Figure 5).

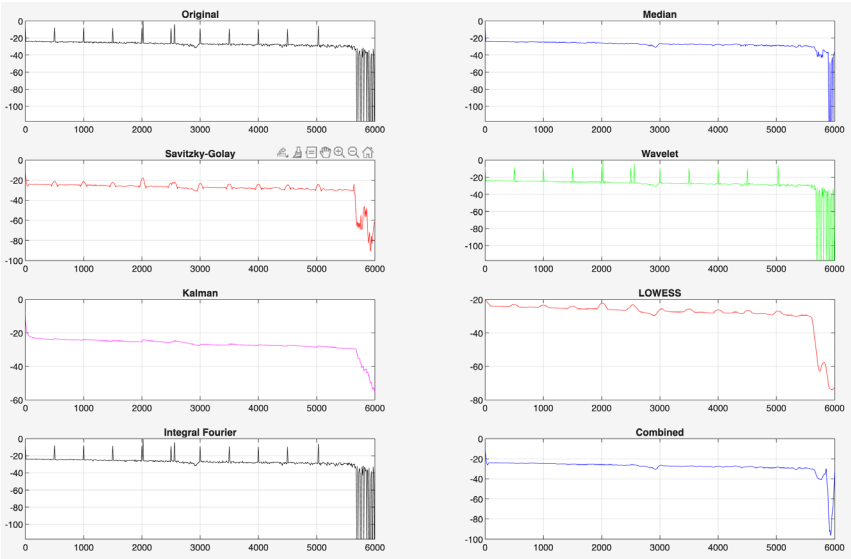


Figure 5 – Comparison of the main types of filtration

Compared to the original method, the median method reduces the impact of significant events and connectors. Also, the combined and Kalman filters smooth the signal too much, leading to the loss of useful information. The Savitsky-Golay and Local Regression (LOWESS) filters highlight the connector but smooth out the other events too much, making it impossible to accurately identify events. Therefore, the optimal solution is to use the Fourier and Wavelet decomposition methods.

Conclusions

Within the framework of this work, the main solutions for monitoring the technical condition of a power cable based on an optical time domain reflectometer were considered. A model based on mathematical expressions was developed to further analyze existing events before implementing the solution in practice. In turn, the analysis of the results showed that the most pronounced changes in the signal are observed in mechanical damage and defects in the connections, while weak effects (vibration, slight stretching and temperature change) require the use of intelligent filtering and spectral analysis methods for their proper isolation. A comparison of signal processing methods has shown that the most effective

approaches are those based on Fourier transform and waves, which provide an optimal balance between noise suppression and preservation of information components.

Thus, the proposed model can become the basis for the development of intelligent monitoring systems for fiber-optic communication lines and power cables, which can increase diagnostic accuracy, improve event positioning and reduce the likelihood of false alarms. A promising area for further research is the integration of the developed model with machine learning methods for automatic classification and prediction of the state of the cable infrastructure in real time.

REFERENCES

1 **Dincer, I., Erdemir, D.** Introduction to Energy Systems [Text]. – Hoboken, NJ, USA : Wiley, 2023. – 576 p. – ISBN: 978-1-119-82576-0.

2 **Blackburn, J. L., Domin, T. J.** Protective Relaying: Principles and Applications [Text]. – 3rd ed. – Boca Raton, FL, USA : CRC Press (Taylor & Francis Group), 2006.

3 **Yang, Y., Chen, K., Gupta, N.** Fiber-Optic Sensors [Text] // In Material-Integrated Intelligent Systems: Technology and Applications. – Hoboken : Wiley, 2018. – P. 107–136. – https://doi.org/10.1002/9783527679249.ch5

4 **Carlino, A., Godio, A.** Laboratory Testing of FBGs for Pipeline Monitoring [Text] // In Sensors. – 2020. – Vol. 20, No. 13. – P. 3797. – https://doi.org/10.3390/s20133797

5 **Udd, E., Spillman, W. B.** Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists [Text]. – Hoboken : Wiley, 2011. – 512 p. – https://doi.org/10.1002/9781118014103.

6 **Wang, J., Zhang, Zh., Zhou, R., Fan, A., Zhai, T., Guo, T.** A Novel Fiber-Optically Powered Partial Discharge Monitoring System for Cable Joints Based on Acoustic Emission [Text] // In IEEE Sensors Journal. – 2025. – Vol. 25, No. 20. – P. 38809–38819. – https://doi.org/10.1109/JSEN.2025.3605966.

7 **Tian, H., Wang, J., Zhang, W., Liu, H., Song, Y., Chen, W.** 110 kV Power Cable External Disturbance Optical Fiber Sensing Detection and Identification Method Based on ResNeXt and Attention Mechanism [Text] // In IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2025. – Vol. 74. – Art. no. 9004111. – https://doi.org/10.1109/TIM.2025.3560744.

8 **Qin, W., Ma, G., Wang, S., Guo, T., Hu, J., Liu, H.** Improving SNR and Sensing Distance of COTDR for Distributed Partial Discharge Detection in Power Cable Joints [Text] // In IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2024. – Vol. 73. – Art. no. 9004309. – https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3419085.

9 **Wang, Z., Zhu G.** Phase-Sensitive OTDR Monitoring for Fault Detection in High-Density Multi-Branch Passive Optical Networks [Text] // In Journal of Lightwave Technology. – 2025. – Vol. 43, No. 22. – P. 9962–9969. – https://doi.org/10.1109/JLT.2025.3608722.

10 **Liu, Z., Yang, S., Chen, Q., Liu, Zh., Zhang, Zh., Li, Z.** Partial Discharge Distributed Locating in Power Cable Joints Using Φ-OTDR Optical Fiber System [Text] // In IEEE Sensors Journal. – 2024. – Vol. 24, No. 9. – P. 14404–14412. – https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3378273.

11 **Xu, S., Wen, Zh., Wang, Y., Tong, Sh., Li, M., Yang, H.** Cable Fault Maintenance and Troubleshooting Method Based on OTDR Combined with Wavelet Transform and CNN [Text] // In 2025 5th International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology (ICEEMT). – Shenzhen, China, 2025. – P. 433–436. – https://doi.org/10.1109/ICEEMT66565.2025.11280721.

12 **Li, C., Chen, X., Shi, Y.** An Event Recognition Method for a Φ-OTDR System Based on CNN-BiGRU Network Model with Attention [Text] // In Photonics. – 2025. – Vol. 12. – P. 313. – https://doi.org/10.3390/photonics12040313

13 **Fouda, B. M. T., Yang, B., Han, D., An, B.** Pattern recognition of optical fiber vibration signal of the submarine cable for its safety [Text] // In IEEE Sensors Journal. – 2021. – Vol. 21, No. 5. – P. 6510–6519. – https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3041318.

14 **Abufana, S. A., Dalveren, Y., Aghnaiya, A., Kara, A.** Variational mode decomposition-based threat classification for fiber optic distributed acoustic sensing [Text] // In IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 100152–100158. – https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2997941.

Received 10.06.26.
Received in revised form 10.06.26.
Accepted for publication 31.08.26.

**И. М. Казамбаев[1], А. Д. Мехтиев[2],*
У. К. Жалмагамбетова[3], Н. Н. Қылышқожа[4]
[1,2]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[1]Astana IT University, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[2]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;
[3]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;
[4]Падова университетінің, Италия Республикасы, Венето.

10.06.26 ж. баспаға түсті.
10.06.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТАЛШЫҚ-ОПТИКАЛЫҚ МОНИТОРИНГ ЖҮЙЕСІНІҢ МОДЕЛІН ӘЗІРЛЕУ

Қазіргі уақытта электр энергиясына сұраныстың артуына байланысты энергиямен жабдықтау жүйесінің барлық компоненттері Қазақстан Республикасының өнеркәсібінде маңызды рөл атқарады. Бұл мақалада қуат кабелінің техникалық жағдайын бақылаудың негізгі шешімдері қарастырылады. Тұтастықты бақылаудың ең дәл шешімдерінің бірі-рефлектометрге негізделген талшықты-оптикалық бақылау жүйесі. Бұл жұмыстың мақсаты-OTDR негізінде талшықты-оптикалық жүйенің моделін жасау. Модельдеу үшін бастапқы деректер берілді, негізгі физикалық параметрлер анықталды. Негізгі оқиғаларға арналған математикалық өрнектер рәсімделді, атап айтқанда діріл, созылу, иілу, қызып кету, қосылыс ақаулары, соққы әсерлері және механикалық зақымданулар. Нәтижелердің дұрыстығына қол жеткізу мақсатында қосымша АҚ Гаусс шуы, дақ-Шу енгізілді. Іске асыру барысында оптикалық сигналды сүзудің бірнеше әдісі қарастырылды және салыстырылды. Ұсынылғандардың ішінде ең тиімдісі-толқын әдісі және функцияны одан әрі интеграциялаумен Фурье қатарына ыдыратуға негізделген әдіс. Нәтижесінде оптикалық талшықтың созылуы, қызуы, қысылуы аз әсер ететін оқиғалар екені анықталды. Өз кезегінде, әзірленген бағдарлама сезімталдықты арттыру мақсатында құбылыстарды зерттеу үшін сигналды масштабтауға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: математикалық модель, талшықты-оптикалық датчик, OTDR, мониторинг жүйесі, күштік кабель.

**И. М. Казамбаев[1], А. Д. Мехтиев[2],*
У. К. Жалмагамбетова[3], Н. Н. Қылышқожа[5]
[1,2]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана;
[1]Astana IT University, Республика Казахстан, г. Астана;
[2]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда;
[3]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;
[4]Университет Падовы,Итальянская Республика, Венето.

Поступило в редакцию 10.06.26.
Поступило с исправлениями 10.06.26.
Принято в печать 31.08.26.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

В настоящее время в связи с повышенным спросом на электроэнергию, все компоненты системы энергоснабжения играют важную роль в промышленности Республики Казахстан. В данной статье рассматриваются основные решения по мониторингу технического состояния силового кабеля. Одним из самых точных решений по контролю целостности является волоконно-оптическая система мониторинга на основе рефлектометра. Целью данной работы является разработка модели волоконно-оптической системы на основе OTDR. Были заданы исходные данные для моделирования, определены основные физические параметры. Были формализованы математические выражения для основных событий, а именно вибрации, растяжения, перегиба, перегрева, дефектов соединений, ударных воздействий и механических повреждений. В целях достижения достоверности результатов были дополнительно введены белый гауссовый шум, спекл-шум. В ходе реализации были рассмотрены и сравнены несколько способов для фильтрации оптического сигнала. Среди всех предложенных наиболее эффективными являются метод Вейвлет и метод на основе разложения функции в ряд Фурье с дальнейшим интегрированием. В результате было выявлено, что растяжение, нагрев, сжатие оптического волокна являются слабозначимыми событиями. В свою очередь разработанная программа позволяет масштабировать сигнал для исследования явлений в целях повышения чувствительности.

Ключевые слова: математическая модель, волоконно-оптический датчик, OTDR, система мониторинга, силовой кабель.

МРНТИ 44.31.35
https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/353-364

А. Е. Карманов[1], *А. У. Габдулов[2], Н. М. Арипова[3], А. П. Плевако[4], А. К. Баянова[5]
[1,2,3,4,5]Торайгыров университет,
Республика Казахстан, г. Павлодар.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7512-0275
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3266-8270
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2760-8617
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3080-5531
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7476-529X
*e-mail: gabdulov25@mail.ru

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ ОТХОДОВ С НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ

В данной статье рассматривается вопрос разработки устройства для утилизации органических отходов с низким содержанием горючих веществ. В качестве органических отходов исследуются угольная мелочь и вскрышные породы. Масштабность добычи угля в Казахстане неизбежно сопровождается большими объёмами отходов, среди которых особое место занимает угольная мелочь, которая достигает 2 % от общего объема добычи угля.

Проведенный анализ показывает, что наиболее эффективным решением утилизации угольных отходов для генерации теплоты в Республике Казахстан является использование реторной горелки. Её использование позволяет сжигать низкокалорийное топливо с высоким содержанием негорючей части. Недостатком ретортной горелки является недогорание частиц топлива вследствие их различного размера.

Авторами разработано устройство на основе ретортной горелки для сжигания угольных отходов с высокой энергоэффективностью за счет дожигания частиц топлива, выходящих из зоны горения на головке горелки и содержащих механический недожог и с автоматическим контролем процесса дожигания.

Ретортная горелка сочетается с рекуперативным узлом дожигания, позволяющим улавливать и эффективно сжигать

падающие несгоревшие частицы, одновременно повышая температуру воздуха, подаваемого в основную зону горения. Повышение КПД устройства происходит за счет дожигания механического недожога и использования этой теплоты.

Ключевые слова: органические отходы, механический недожог, энергоэффективность, подогрев воздуха, угольная мелочь, ретортная горелка.

Введение

Современные тенденции в области энергетики и утилизации бытовых и производственных отходов требуют применения высокоэффективных теплотехнических устройств, способных работать на широком спектре твёрдого топлива, включая низкокалорийные отходы. Работа с отходами, особенно с низкокалорийными видами биомассы и органическими остатками, сопровождается рядом технических проблем: нестабильным горением, большим выделением летучих веществ, образованием значительного количества несгоревших частиц, требующих дополнительного дожига. Всё это приводит к снижению эффективности горения, повышению себестоимости теплоты и росту экологических выбросов.

В Казахстане актуальным является вопрос утилизации угольных отходов с генерацией теплоты. Масштабность добычи угля в Казахстане неизбежно сопровождается большими объёмами отходов, среди которых особое место занимает угольная мелочь – тонкодисперсные остатки, образующиеся при дроблении, обогащении, транспортировке и хранении угля [1]. В процессе добычи угля до 2 % мелкой фракции может не реализовываться и накапливаться в отвалах, что негативно сказывается на окружающей среде. Для Казахстана это количество может достигать миллионов тонн ежегодно [2].

Кроме угольной мелочи в процессе добычи угля образуются вскрышные породы, содержащие горючую часть. Вскрышные породы, угольная мелочь, угольные шламы и т.д. складируются на угольных отвалах. Вследствие содержания горючей части, угольные отвалы часто горят. Значительное количество добываемого в Казахстане угля, которое в 2024 году составило 112 986,3 тыс. тонн [3], заставляет задуматься о выборе оптимального решения для утилизации угольных отходов Казахстана.

Одним из наиболее перспективных решений, применяемых в отопительных агрегатах и установках по сжиганию органических отходов, является ретортная горелка. Данный тип горелок представляет собой устройство, в котором топливо подаётся шнеком в головку реторты и сгорает

на её поверхности, что обеспечивает дозированную подачу и упрощённое удаление золы [4].

Одним из ключевых преимуществ ретортной горелки является возможность использования низкокалорийных промышленных отходов. Согласно технической документации производителей [5], подобные устройства способны эффективно сжигать топливо с теплотворной способностью от 1610 ккал/кг, что позволяет применять их для утилизации органических отходов.

Несмотря на конструктивные достоинства, эффективность устройств для сжигания низкосортного топлива остаётся сильно вариативной. По данным исследований [6] эффективность пеллетных ретортных горелок может составлять от 60 до 90 %, при этом конечные значения зависят от качества топлива, параметров подачи воздуха и особенностей конструкции горелочного устройства. При любом топливе с неравномерным фракционным составом эффективность горения часто снижается из-за неполного сгорания частиц топлива.

Одним из основных факторов потерь тепловой энергии является механический недожог, то есть количество несгоревших частиц топлива, удаляемых с золой. Например, для угля марки ДСМШ (Длиннопламенный уголь, фракция “семечко”, мелкий, штыб.) механический недожог при сжигании топлива в ретортной горелке (водогрейного котла типа Carborobot-40, мощностью 40 кВт) составляет 5,2 %. На ряде других котельных агрегатов это значение может доходить до 10 % [7]. Повышенный механический недожог ведёт к прямым энергетическим потерям и снижению эксплуатационной эффективности.

Однако при сжигании отходов этот показатель зачастую оказывается значительно выше из-за неоднородности фракции, низкой калорийности топлива и недостаточной турбулизации воздушных потоков [8].

Материалы и методы

Рассмотрим варианты повышения эффективности сжигания топлива в ретортной горелке.

Во-первых, повышение КПД ретортной горелки вследствие обеспечения сжигания одинаковой фракции топлива. Для обеспечения однородной фракции топлива требуется дополнительная переработка топлива: измельчение, грохочение, сушка и контроль распределения частиц по размерам (PSD). Эти технологические этапы повышают себестоимость производства единицы тепла, что подтверждают исследования по себестоимости и влиянию размера частиц на качество топлива [9].

Во-вторых, повышение КПД ретортной горелки за счет качественного регулирования подачи воздуха. Избыточная подача воздуха в камеру сгорания увеличивает потери тепла с уходящими газами, так как нагреваемый избыточный воздух забирает часть теплоты, и при неоптимизированной системе это снижает суммарный КПД устройства. Эффект зависит от конструкции котла, влажности и свойств топлива, поэтому точное количество потерь определяется экспериментально [10].

В-третьих, это использование новых эффективных устройств для сжигания, обладающих невысокой стоимостью.

Предполагаемое устройство должно в первую очередь осуществлять процесс дожига недогоревших частиц, поэтому оно должно содержать колосниковую решетку и подачу воздуха на горение. Во вторую очередь, теплота, получаемая при дожиге частиц, должна полезно использоваться для функционирования ретортной горелки. Рациональным решением отвечающим вышеуказанным требованиям является использование рекуперативного теплообменника с дожиганием недогоревших частиц.

В связи с этим в данной статье поставлена задача – разработать устройство на основе ретортной горелки для сжигания угольных отходов с высокой энергоэффективностью за счет дожигания частиц топлива, выходящих из зоны горения на головке горелки и содержащих механический недожог с автоматическим контролем процесса дожигания.

Результаты и обсуждение

Повышение эффективности сжигания угольных отходов в разработанном устройстве осуществляется за счёт использования рекуперативного устройства для дожигания несгоревших частиц и подогрева за счет этой теплоты воздуха, который подается в ретортную горелку для сжигания частиц угольных отходов.

Устройство для сжигания угольных отходов представлено на рисунке 1.

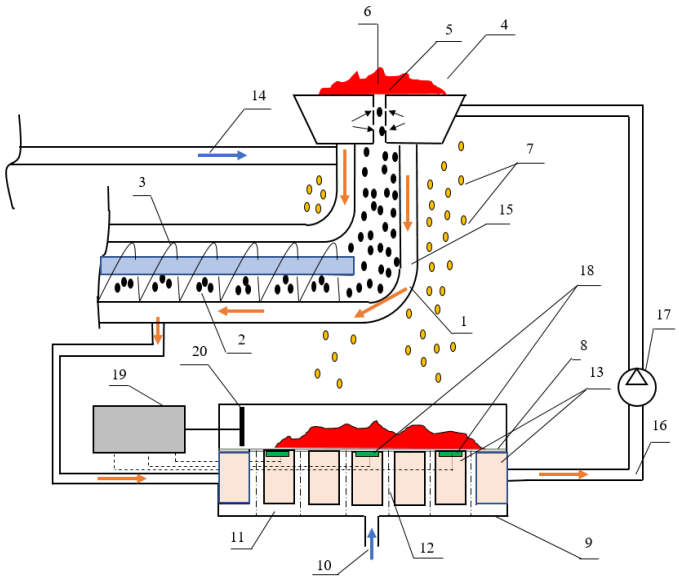


Рисунок 1 – Устройство для сжигания угольных отходов

1 – Корпус ретортной горелки; 2 – угольные отходы, подаваемые на сжигание; 3 – шнек; 4 – головка ретортной горелки; 5 – сопла в головке ретортной горелки; 6 – отверстие для подачи топлива; 7 –частицы с механическим недожогом; 8 – колосниковая решётка; 9 – установка для дожигания механического недожога; 10 – воздух для дожигания частиц с механическим недожогом; 11 – распределительное устройство; 12 – трубы для подачи воздуха на колосниковую решетку; 13 – межтрубное пространство; 14 – воздух для сжигания угольных отходов в ретортной горелке; 15 –межтрубное пространство корпуса горелки; 16 – воздухопровод; 17 – вентилятор; 18 – датчики температуры; 19 – преобразователь; 20 –толкатель.

В горелку 1 подаются угольные отходы 2, которые внутри горелки перемещаются за счет шнека 3 в головку горелки 4, где происходит их сжигание. В головке горелки 4 расположены сопла 5, которые подают воздух для горения.

Частицы угольных отходов, проходя в головке горелки 4 снизу вверх через отверстие 6, попадают на горизонтальную часть головки горелки 4. Далее за счет поступления новых порций топлива, предыдущие

частицы угольных отходов начинают движение от центра головки горелки 4 радиально к ее периферии. В это время происходит их горение.

После прохождения головки горелки 4 частицы 7, содержащие механический недожог, падают за пределы головки горелки. Эти частицы 7, содержащие механический недожог, содержат в себе как полностью сгоревшую часть, то есть золу, так и частично недогоревшую часть (механический недожог). Неполное сгорание частиц 7, содержащих механический недожог, которые падают с головки горелки 4, объясняется использованием органических отходов 2, содержащих разные размеры исходных частиц. Мелкие частицы сгорают и образуют золовые частицы, более крупные частицы не успевают за время нахождения в зоне горения на головке горелки 4 полностью прогореть.

В дальнейшем частицы 7, содержащие механический недожог, попадают на колосниковую решетку 8 устройства для дожигания механического недожога 9, где за счет подачи вертикально снизу воздуха 10 для дожигания этих частиц, они догорают. Воздух 10 для дожигания частиц 7, содержащих механический недожог, подается через распределительное устройство 11 и далее по трубам для подачи воздуха 12 на колосниковую решетку 8.

В межтрубное пространство 13 подается воздух 14, который проходит в межтрубном пространстве 15 части горелки 1, содержащей зону подачи топлива в головку горелки 4, расположенную над устройством для дожигания механического недожога 9. Зона подачи топлива в головку горелки 4 расположенная над устройством для дожигания механического недожога 9 представляет собой устройство “труба в трубе”, где по внутренней трубе проходят органические отходы в головку горелки 4, а в межтрубном пространстве 15 идет воздух 14, подаваемый в межтрубное пространство 13 устройства для дожигания механического недожога 9. Этот воздух 14, проходя в межтрубном пространстве 15 части горелки 1, содержащей зону подачи топлива в головку горелки 4, нагревается за счет теплоты, отдаваемой при дожигании частиц 7, содержащих механический недожог, вследствие расположения этой части горелки над устройством для дожигания механического недожога 9. Далее этот воздух 14, проходя в межтрубном пространстве 13, нагревается за счет теплоты от соприкосновения с колосниковой решеткой 8 устройства для дожигания механического недожога 9 и далее поступает в воздухопровод 16, в котором установленный вентиллятор 17 подает уже нагретый воздух непосредственно в сопла 5 головки горелки 4 для сжигания угольных отходов 2.

По мере прогорания частиц 7, содержащих механический недожог, на колосниковой решетке 8 устройства для дожигания механического

недожога 9, образующиеся золовые частицы необходимо удалять. Для этого установлены датчики температуры 18, которые закреплены на колосниковой решетке 8 устройства для дожигания механического недожога 9 со стороны межтрубного пространства 13. При снижении среднеарифметической температуры, которую выдают датчики температуры 18, ниже заданного уровня, преобразователь 19, получая сигналы от датчиков температуры 18, посредством действия толкателя 20 на золовые частицы, убирает их с колосниковой решетки 8 устройства для дожигания механического недожога 9. Количество устанавливаемых датчиков температуры принимают равным трем. Они расположены на продольной осевой линии рекуперативного устройства и находятся: один датчик в середине отрезка, соединяющего боковые стенки рекуперативного устройства, а два остальных датчика – на отрезках между центральным датчиком и боковыми стенками устройства для дожигания механического недожога 9. После сброса золовых частиц, толкатель 20 возвращается в исходное положение.

Вновь падающие с головки горелки 4 частицы 7, содержащие механический недожог, начинают образовывать слой на колосниковой решетке 8, который снова выделяет теплоту, направляющийся по воздухопроводу 16 на сжигание угольных отходов 2.

Разработанное устройство позволяет использовать теплоту от дожигания механического недожога для нагрева воздуха, подаваемого для сжигания в ретортную горелку. Устройство не требует значительных капитальных затрат, простое в эксплуатации, не требует существенных затрат электроэнергии. С экологической точки зрения повышение эффективности сжигания сокращает удельный расход топлива, недогоревших частиц, что сокращает количество выбросов вредных веществ.

Ретортная горелка сочетается с рекуперативным узлом дожигания, позволяющим улавливать и эффективно сжигать падающие несгоревшие частицы, одновременно повышая температуру воздуха, подаваемого в основную зону горения. Внедрение подобного решения позволяет уменьшить механический недожог, стабилизировать процесс горения и повысить общую эффективность ретортной горелки.

Информация о финансировании

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP26196911)

Выводы

1. Разработанное устройство с рекуперативным узлом дожигания обеспечивает более полное сгорание топлива за счёт улавливания и дожигания несгоревших частиц.

2. Использование данного устройства позволит решить две важные задачи: обеспечить утилизацию угольных отходов, которые в Казахстане в больших количествах складируются на отвалах, и генерировать тепловую энергию с низкой себестоимостью за счет использования в качестве топлива отходов угольной промышленности. С экологической точки зрения повышение эффективности процесса сжигания способствует снижению удельного расхода топлива, несгоревших частиц, что приводит к сокращению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

3. Применение предложенного решения способствует повышению энергоэффективности установки и снижению экологической нагрузки за счёт более рационального использования угольных отходов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Жолдасбай, Е. Е., Аргын, А. А., Досмухамедов, Н. К.** Инновационные технологии для утилизации отходов от сжигания угля – ядро устойчивого развития угольной отрасли [Текст] // Горный журнал Казахстана. – 2023. – № 5. – С. 24–28.

2 Наука Казахстана [Электронный ресурс]. – URL: https://www.nauka.kz/page.php/upload/images/images/upload/files/error.html?lang=1&new=&news_id=9730&page_id=1001&utm_source/ (Дата обращения: 01.12.2025).

3 Бюро национальной статистики Казахстана [Электронный ресурс]. – URL: https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-industrial-production// (Дата обращения: 01.12.2025).

4 Ретортная горелка (определение) [Электронный ресурс]. – URL: https://firebox.com.ua/ru/retortnaya-gorelka-opredelenie/ (Дата обращения: 01.12.2025).

5 Паспорт и руководство по эксплуатации. Котлы пеллетные Lavoro Eco. [Электронный ресурс]. – URL: https://static.proteplo-spb.ru/iblock/ca6/ca6de3aca0b9860bf975ba5990cb31f3/cf5ff42b61a9d370eef8a2b325c40989.pdf / (Дата обращения: 26.11.2025).

6 **Garcia-Maraver, A., Pérez-Jiménez, J. A.** Biomass Pelletization. Standards and Production. // – Southampton: WIT Press. – 2015. – 92 p. – ISBN 978-1-78466-062-8.

7 **Богомолов, А. Р., Анферов, Б. А., Темникова, Е. Ю., Лапин, А. А.** Анализ эффективности работы котельного агрегата «CARBOROBOT–40» [Текст] // Ползуновский вестник. – 2015. – №4. – Т. 1. – С. 61-67.

8 Ретортные пеллетные горелки [Электронный ресурс]. – URL: https://gazanet.ru/info/retortnye-pelletnye-gorelki/ (Дата обращения: 26.11.2025.

9 **Li, W., Wang, M., Meng, F., Zhang, Y., Zhang, B.** A review on the effects of pretreatment and process parameters on properties of pellets // Energies. – 2022. – Vol. 15, № 19. – Article 7303. – https://doi.org/10.3390/en15197303.

10 **Zhang, G.** Study on Optimum Excess Air Coefficient for Power Plant Boilers // Proceedings of the 2015 International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering. – 2015. – P. 1374–1378. – https://doi.org/10.2991/meic-15.2015.315.

References

1 **Zholdasbay, E. E., Argyn, A. A., Dosmukhamedov, N. K.** Innovatsionnye tekhnologii dlya utilizatsii otkhodov ot szhiganiya uglya – yadro ustoychivogo razvitiya ugolnoy otrasli [Innovative technologies for the utilization of coal combustion waste are the core of sustainable development of the coal industry] [Text] // Gornyy zhurnal Kazakhstana. – 2023. – №5. – P. 24-28.

2 Nauka Kazakhstana [Science of Kazakhstan] [Electronic resource]. – Access mode: https://www.nauka.kz/page.php/upload/images/images/upload/files/error.html?lang=1&new=&news_id=9730&page_id=1001&utm_source/ (Accessed: 01/12/2025).

3 Byuro natsionalnoy statistiki Kazakhstana [Bureau of National Statistics of Kazakhstan] [Electronic resource]. – Access mode: https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-industrialproduction// (Accessed: 01/12/2025).

4 Retortnaya gorelka (opredelenie) [Retort burner (definition)] [Electronic resource]. – Access mode: https://firebox.com.ua/ru/retortnaya-gorelka-opredelenie/ (Accessed: 01/12/2025).

5 Pasport i rukovodstvo po ekspluatatsii. Kotly pelletnye Lavoro Eco. [Passport and instruction manual. Lavoro Eco pellet boilers] [Electronic resource]. – Access mode: https://static.proteplo-spb.ru/iblock/ca6/ca6de3aca0b9860bf975ba5990cb31f3/cf5ff42b61a9d370eef8a2b325c40989.pdf/ (Accessed: 26/11/2025).

6 **Garcia-Maraver, A., Pérez-Jiménez, J. A.** Biomass Pelletization. Standards and Production. // – Southampton: WIT Press. – 2015. – P. 92. – ISBN 978-1-78466-062-8.

7 **Bogomolov, A. R., Anferov, B. A., Temnikova, E. Yu., Lapin, A. A.** Analiz effektivnosti raboty kotelnogo agregata «CARBOROBOT–40» [Analysis of the efficiency of the boiler unit "CARBOROBOT-40"] [Text] // Polzunovskiy vestnik. – 2015. – №4. – Vol. 1. – P. 61–67.

8 Retortnye pelletnye gorelki [Retort pellet burners] [Electronic resource]. – Access mode: https://gazanet.ru/info/retortnye-pelletnye-gorelki/ (Accessed: 26/11/2025).

9 **Li, W., Wang, M., Meng, F., Zhang, Y., Zhang, B.** A review on the effects of pretreatment and process parameters on properties of pellets // Energies. – 2022. – Vol. 15, № 19. – Article 7303. – https://doi.org/10.3390/en15197303.

10 **Zhang, G.** Study on Optimum Excess Air Coefficient for Power Plant Boilers // Proceedings of the 2015 International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering. – 2015. – P. 1374–1378. – https://doi.org/10.2991/meic-15.2015.315.

Поступило в редакцию 31.07.26.
Поступило с исправлениями 26.08.26.
Принято в печать 03.09.26.

*А. Е. Карманов[1], *А. У. Габдулов[2], Н. М. Арипова[3], А. П. Плевако[4], А. К. Баянова[5]*
[1,2,3,4,5]Торайғыров университеті,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
31.07.26 ж. баспаға түсті.
26.08.26 ж. түзетулерімен түсті.
03.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТӨМЕН ЖАНҒЫШ ЗАТТАР ҚҰРАМЫ БАР КӨМІР ҚАЛДЫҚТАРЫН КӘДЕГЕ ЖАРАТУҒА АРНАЛҒАН ҚҰРЫЛҒЫНЫ ӘЗІРЛЕУ

Бұл мақалада жанғыш заттардың мөлшері төмен органикалық қалдықтарды кәдеге жаратуға арналған құрылғыны әзірлеу мәселесі қарастырылады. Органикалық қалдықтар ретінде көмір ұнтағы және аршынды жыныстар зерттеледі. Қазақстанда көмір өндірудің ауқымдылығы сөзсіз түрде үлкен көлемдегі қалдықтардың түзілуімен қатар жүреді, олардың ішінде көмір ұнтағы ерекше орын алады және ол жалпы өндірілген көмір көлемінің шамамен 2 %-ына дейін жетеді.

Жүргізілген талдау нәтижелері Қазақстан Республикасында жылу энергиясын өндіру кезінде көмір қалдықтарын тиімді кәдеге жаратудың ең оңтайлы тәсілдерінің бірі ретортты оттықты қолдану болып табылатынын көрсетеді. Оны қолдану жанғыш бөлігі аз, төмен калориялы отынды жағуға мүмкіндік береді. Алайда ретортты жанағының кемшілігі – отын бөлшектерінің әртүрлі өлшемдеріне байланысты олардың толық жанбауы болып табылады.

Авторлар ретортты жанағы негізінде көмір қалдықтарын жоғары энергия тиімділікпен жағуға арналған құрылғы әзірледі. Бұл құрылғы жану аймағынан шығатын және механикалық толық жанбаған бөлшектерді қосымша жағу арқылы жұмыс істейді, сондай-ақ дожигание процесін автоматты түрде бақылаумен қамтамасыз етіледі.

Ретортты жанағы рекуперативті дожигание торабынымен біріктірілген, ол жанбай қалған бөлшектерді тиімді ұстап, толық жағуға мүмкіндік береді, сонымен қатар негізгі жану аймағына берілетін ауаның температурасын арттырады. Құрылғының пайдалы әсер коэффициенті механикалық толық жанбаған отынды жағу және осы жылуды пайдалану есебінен жоғарылайды.

Кілтті сөздер: органикалық қалдықтар, механикалық толық жанбау, энергия тиімділігі, ауаны алдын ала қыздыру, көмір ұнтағы, ретортты жанағы.

*A. E. Karmanov[1], *A. U. Gabdulov[2], N. M. Aripova[3], A. P. Plevako[4], A. K. Bayanova[5]*
[1,2,3,4,5]Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 31.07.26.
Received in revised form 26.08.26.
Accepted for publication 03.09.26.

DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR UTILIZATION OF COAL WASTE WITH LOW COMBUSTIBLE CONTENT

This article considers the development of a device for the utilization of organic waste with a low content of combustible matter. Coal fines and overburden rocks are studied as organic waste. The large-scale coal mining in Kazakhstan inevitably leads to the formation of significant volumes of

waste, among which coal fines occupy a special place and can reach up to 2 % of the total coal production.

The conducted analysis shows that the most effective solution for the utilization of coal waste for heat generation in the Republic of Kazakhstan is the use of a retort burner. Its application makes it possible to burn low-calorific fuel with a high content of non-combustible components. However, a disadvantage of the retort burner is incomplete combustion of fuel particles due to their different sizes.

The authors have developed a device based on a retort burner for efficient combustion of coal waste. The device ensures higher energy efficiency by afterburning fuel particles leaving the combustion zone, which contain mechanical unburned residues, and includes automatic control of the afterburning process.

The retort burner is combined with a recuperative afterburning unit, which allows capturing and efficiently burning falling unburned particles while simultaneously increasing the temperature of the air supplied to the main combustion zone. The efficiency of the device is improved due to the combustion of mechanical unburned fuel and utilization of the released heat.

Keywords: organic waste, mechanical unburned fuel, energy efficiency, air preheating, coal fines, retort burner.

SRSTI 44.29.37

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/365-383

N. S. Kydyrov[1], V. V. Kaverin[2], A. V. Yurchenko[3]

[1,2] Abylkas Saginova Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;
[3]Tomsk Polytechnic University,
Russian Federation, Tomsk.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8732-3775
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2021-7445
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7854-5495
*e-mail: nurken.kydyrov20@gmail.com

STUDY OF EMERGENCY SITUATIONS ON HIGH AND ULTRA-HIGH VOLTAGE POWER LINES

High- and ultra-high-voltage overhead power lines are critical for maintaining a reliable electricity supply to industrial consumers and regional power systems in the Republic of Kazakhstan. The country's large geographic extent, coupled with harsh and highly variable climatic conditions, imposes additional demands on the stable operation of transmission networks. In recent years, there has been an upward trend in emergency events on transmission lines, resulting in power interruptions, economic damage and a decrease in the overall reliability of the power system. The present study focuses on a detailed analysis of emergency situations on high- and ultra-high-voltage power lines in the Republic of Kazakhstan in the period 2020–2024.

The study draws on the analysis and synthesis of statistical data on technological disturbances, records of relay protection and automatic reclosing performance, cartographic examination of the power supply system, and a review of regulatory and technical documents. The principal types of emergency events are distinguished, including conductor galloping with associated short circuits, icing, interphase arc flashovers initiated by birds, direct lightning impacts, and failures of polymer insulators. Special emphasis is placed on the role of meteorological conditions – strong winds, icing, and thunderstorm activity – in shaping both the frequency and the characteristics of accidents.

The study assesses automatic reclosing devices and demonstrates their key role in clearing transient faults and reducing the impact of emergencies.

The analysis also reveals the limitations of conventional relay protection systems in reliably distinguishing between electrical and mechanical faults. The paper substantiates the applicability of intelligent protection solutions based on fuzzy logic to enhance fault recognition accuracy and increase decision-making reliability. The proposed technical and organizational measures are aimed at improving the operational reliability of transmission lines and supporting the sustainable development of the power system of the Republic of Kazakhstan.

Keywords: high-voltage overhead power lines, emergency situations, conductor galloping, electric arc flashover, meteorological conditions, automatic reclosing, reliability of power systems.

Introduction

Power transmission lines (PTLs) play a key role in providing electricity to industrial enterprises in the Republic of Kazakhstan (RK). The country's extensive energy infrastructure includes high-voltage and ultra-high-voltage transmission lines that connect major regions and ensure the transmission of electricity between major energy facilities. However, in recent years, incidents of power line emergencies have become more frequent, significantly impacting the stability of the power supply [1].

Emergencies on power transmission lines can be caused by both natural factors (hurricanes, icing, lightning strikes) and man-made causes (equipment wear, operating errors, external damage). Analysis of these accidents is an important task for developing measures aimed at reducing the number of emergencies and minimizing their consequences [2].

This work is devoted to the study of emergency situations on high-voltage and ultra-high-voltage power lines in the Republic of Kazakhstan, since they are the most significant in the power supply of the Republic. The aim of the study is to identify the main causes of accidents, analyze their consequences, and develop recommendations for improving the reliability of power lines. Particular attention is paid to analyzing the current state of the infrastructure, as well as the impact of climatic conditions on power supply reliability.

Due to the growth of manufacturing enterprises in Republic, the load on the energy system will increase [2; 3]. The main objective of the work is to analyze emergency situations in high- and ultra-high-voltage systems and to substantiate the required set of technical solutions to improve the reliability and reduce the accident rate of the power supply system. To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks: analyze emergency situations; determine the influence of cause-and-effect relationships between climatic factors and the technical condition of the

transmission line structural elements on the occurrence of emergency situations; substantiate a set of measures and technical solutions to ensure increased reliability of the power supply system.

To achieve the stated goals and perform the tasks of investigating emergency situations on high-voltage and ultra-high-voltage power lines in the Republic of Kazakhstan, the following methods were used [4]:

1. Analysis and generalization of statistical data from publicly available sources;
2. Cartographic analysis of the power supply system;
3. Diagnostics of the technical condition of equipment;
4. Analysis of regulatory recommendations.

The use of an integrated approach and complementary methods made it possible to conduct a comprehensive study and develop well-founded proposals to reduce the risk of accidents on high-voltage and ultra-high-voltage power lines.

Materials and methods

The research relies on a comprehensive analysis of emergency events on high- and ultra-high-voltage overhead power lines in the Republic of Kazakhstan over the period 2020–2024. As input data, publicly available statistics on technological disturbances and records of relay protection performance and automatic reclosing were used. The source data were classified by disturbance types (conductor galloping and short circuits, direct lightning impacts, interphase arc flashovers caused by birds, polymer insulator defects, overload-related outages) and by automatic reclosing outcome (successful/unsuccessful), which made it possible to evaluate both the dynamics of the failure rate and the effectiveness of protection operations.

To reveal cause-and-effect relationships, a comparative analytical method was employed. The impact of meteorological conditions (wind loads, icing, thunderstorm activity) and external influences on the probability of outages was assessed by comparing disturbance categories and their annual frequency. Additionally, cartographic analysis of the power supply system was used to account for the territorial characteristics of transmission line routes and the operating conditions of high-voltage networks, including segments located in remote and difficult-to-access areas. Diagnostics of the technical state of line components (conductors, insulator strings, fittings, towers and vibration dampers) was treated as a key factor in explaining failures related to wear, latent defects and material aging.

The diagnostic assessment was clarified as an integrated procedure combining visual inspection, analysis of relay protection and automatic reclosing data, thermal imaging of contact joints and insulator strings, and UAV inspection of line sections with limited accessibility. In assessing overhead line elements, attention was focused on the condition of conductors, fittings, polymer insulators, vibration dampers, towers, and grounding components. Thermal imaging was used to

identify local overheating associated with increased contact resistance, overloads, or leakage currents. UAV inspection made it possible to detect mechanical damage, corrosion, displacement of vibration dampers, defects in insulator strings, and foreign objects located near live parts. The assessment of polymer insulators was also related to the identification of partial discharge activity and visible signs of surface degradation, since these defects can gradually reduce insulation strength and increase the likelihood of emergency outages [5-7].

Regulatory and technical documents in force in the Republic of Kazakhstan were examined to link the observed disturbance types with existing operational requirements and protection principles. Based on this analysis, a set of technical measures to reduce the outage rate (including scheduled maintenance, vibration mitigation, meteorological monitoring and UAV-based inspections) was substantiated, and the use of fuzzy-logic decision-making elements in protection and automatic reclosing schemes was justified to improve the reliability of distinguishing between electrical and mechanical faults.

Results and discussions

The electric power system of the Republic of Kazakhstan uses overhead high-voltage transmission lines for the transmission of electricity. Operation of existing transmission lines and the design of new ones are carried out in accordance with regulatory requirements approved in the Republic of Kazakhstan [8].

Particular attention is paid to increasing the reliability and improving the operational characteristics of high-voltage power transmission lines, since their condition directly affects the stability of the power supply to industrial enterprises.

The most serious problem in the operation of power transmission lines is emergency situations, which can be caused by many factors [9].

Currently, in order to prevent the development of technological violations, complex protection systems are used.

The integrated substation protection system consists of:

– short circuit current protection;
– differential protection (one of the most accurate types of protection).
– against ground faults (implemented to protect power transmission lines when single-phase ground faults occur);
– distance protection (measures the impedance (resistance) of the line and determines the distance to the fault location);
– automatic reclosing devices (ARD);
– multi-stage protection with several levels (fast-acting and time-delayed);
– surge protection devices.
– overload protection (OLP)

If the emergency situation was short-lived and did not lead to serious consequences, the controlled section of the power line is connected to the power source and the automatic reclosing device is considered successful. The classification of emergency situations on high-voltage and ultra-high-voltage transmission lines from 2020 to 2024 is presented in Table 1.

Table 1 – Statistics of emergency situations on high-voltage and ultra-high-voltage power lines

Technological disturbances on power lines and reactions of the protection system	2020	2021	2022	2023	2024
The number of technological failures due to conductor galloping with subsequent restoration of the electrical circuit	3	2	2	3	1
The power line shutdown was a short circuit between the phase wire and the ground wire or a fall of the phase wire to the ground.	1	1	2	1	3
The number of direct lightning strikes on live wires of power transmission lines.	1	1	2	2	1
Interphase electric arcs caused by birds	9	7	3	5	6
Number of outages due to polymer insulator failure	1	1	2	2	2
Number of network overload outages	1				
Successful automatic reclosing devices	13	10	7	10	8
Unsuccessful automatic reclosing devices	3	2	4	3	5
Total number of technological violations	16	12	11	13	13

1. Analysis and generalization of statistical data on technological violations at high and extra-high voltage (2020–2024)

General analysis of the dynamics of technological disturbances :

From 2020 to 2024, the total number of power transmission line faults fluctuated between 11 and 16 per year. The lowest number of faults (12) was recorded in 2021, while the highest number (16 and 14, respectively) was observed in 2020 and 2024.

2. Analysis of individual types of technological violations:

The phenomenon of conductor galloping, causing a short circuit, followed by the activation of protection and restoration of the electrical circuit, occurs annually, but the frequency of emergency shutdowns varies.

– In 2020 and 2023, 3 cases were registered, which is the maximum figure.

– In 2024, the lowest number of accidents was recorded (1 case).

– The overall reduction may indicate the effectiveness of the measures taken to combat conductor galloping, such as the installation of additional supports, the installation of damper spacers, the installation of interphase spacers, the installation of additional garlands, etc.

Short circuits between the current-carrying wire and the ground wire due to conductor galloping.

This type of violation has minor deviations:

– In 2022 and 2024, 2 cases were recorded.

– In 2020, 2021 and 2023 – 1 case each.

– In 2024, the number of such cases increased, which may indicate the need for further analysis of lightning protection design.

Direct lightning strikes on live wires

– In 2020 and 2021, 1 case was registered each.

– In 2022–2024, 2 cases were recorded annually.

– The increase in the number of lightning strikes may be due to changes in climate conditions or insufficient efficiency of lightning protection devices.

Interphase arc flashovers due to birds.

– In 2020, there were 9 cases, which is the maximum figure.

– In 2022, only 3 cases were recorded – the minimum level.

– In 2023–2024, a slight increase to 5–6 cases was noted.

– The introduction of additional protective measures (for example, the installation of bird protection devices) can partially reduce the frequency of such incidents.

Destruction of polymer insulators.

– The number of insulator destructions has gradually increased from 1 case in 2020 and 2021 to 2 cases in 2022–2024.

– The increase in the number of incidents may be due to the impact of external factors (ultraviolet radiation, high dynamic loads on insulator strings caused by gusts of wind, conductor galloping and ice deposits, aging of the material).

Exposure to high current load.

– The only registered case occurred in 2020.

– The absence of similar violations in subsequent years may indicate the correct operation of the power lines or the introduction of more efficient load management methods.

3. Analysis of successful and unsuccessful application of automatic reclosing (AR) on high and extra-high voltage power transmission lines in Republic of Kazakhstan.

Successful application of ARD allows to ensure:

– reducing the consequences of an emergency;

– reduction of operating costs.

– combination of the automatic reclosure control system with modern monitoring systems.

The main causes of technological failures on power transmission lines are:

1. Meteorological conditions: strong winds, storms, icing, thunderstorms, floods.

2. Mechanical damage to the elements of the power transmission line structure (falling trees, transport accidents, impact of unauthorized persons, design defects).

3. Technical faults : expiration of service life, hidden defects of overhead power line elements or construction deficiencies [5; 10].

4. A particular threat to high-voltage and ultra-high-voltage power lines is posed by adverse weather conditions, such as gusty winds, which cause conductors gallop and lead to mechanical damage to the elements of the power line structures and the shutdown of a section of the power supply system with successful or unsuccessful automatic reclosure .

Analysis of emergency situations on high and extra-high voltage power lines.

Between 2020 and 2024, Republic of Kazakhstan experienced various power line emergencies caused by strong winds and other factors, such as:

• The proximity of live wires to grounded parts of supports, causing an electric arc flashover due to gusts of wind. Such outages are usually accompanied by successful automatic reclosure [11].

• Vibrations of wires leading to mechanical damage to wires, Linear suspension and almost always with unsuccessful automatic reclosure.

• An electric arc flashover between a phase conductor and a ground wire caused by strong wind gusts and wire movement. Most often, such outages are successfully reclosed.

• Icing on power transmission lines in Republic of Kazakhstan, especially in winter, is one of the main causes of emergency outages. The country's climatic conditions – temperature fluctuations, high humidity, and wind loads – facilitate the formation of ice, which increases the load on wires and structures, threatening the integrity of transmission line components and the reliability of the power system. Such incidents are most often identified, and measures are taken to prevent emergency outages and damage to transmission line components.

• Electrochemical frost is a form of icing that occurs on power transmission lines (PTLs) as a result of a combination of electromagnetic processes and adverse weather conditions. In the Republic of Kazakhstan, this phenomenon is observed primarily during the cold season, especially in areas with high humidity and sudden temperature fluctuations. Measures taken are similar to those used for icing [6].

- Lightning strikes are a common cause of emergency outages on high-voltage and ultra-high-voltage power lines (HV/EVL) in Republic of Kazakhstan. Lightning can cause equipment damage, power outages, and even major grid failures. The number of such incidents from 2020 to 2024 reached 12 in the Karaganda region alone, demonstrating the vulnerability of power lines to this type of impact. To reduce the effect of lightning surges on power lines, regular inspection and repair of ground wires , lightning protection components , and grounding of poles are undertaken.

Justification of the use of fuzzy logic in the power transmission line protection system

Existing relay protection systems for high-voltage and ultra-high-voltage transmission lines have limitations related to their insufficient ability to accurately analyze the nature of fault situations. For example, a wire break that touches other phases or the ground causes a short circuit. However, due to the lack of an effective diagnostic mechanism, the automatic reclosure system may trip prematurely, even if the underlying cause of the fault has not been eliminated [12].

Furthermore, a wire break often creates a false arc fault, leading to an incorrect protection response. Existing circuits are unable to reliably distinguish a wire break from an arc fault, as sudden changes in current and voltage are often accompanied by electromagnetic interference, which the system interprets as a short circuit.

It's also worth noting the low information yield of traditional protection devices: their algorithms don't allow for a clear determination of the nature of a fault – whether electrical or mechanical. This significantly reduces the accuracy and effectiveness of fault localization. Therefore, there is a need to develop an improved protection system capable of performing a comprehensive analysis of network parameters, ensuring more accurate diagnostics and preventing reconnections in the event of unrepaired faults [7].

One way to improve the reliability of emergency diagnostics is to use diagnostic systems based on fuzzy logic. Fuzzy logic is used in protection systems for high-voltage and ultra-high-voltage substations, particularly in automatic reclosing and relay protection. Its use improves the accuracy and adaptability of protection systems in the face of intermittent damage to transmission line components [13].

Advantages of fuzzy logic:

- Possibility of processing uncertain or partially reliable information.
- Improving the reliability of accident classification (mechanical damage vs. electrical short circuit).
- Flexibility in deciding whether to file an automatic reclosing devices
- Increased selectivity and reliability of automatic reclosing [13].

Table 2 – Simplified fuzzy rule base for automatic reclosing decision-making

Input condition	Fuzzy assessment	Decision for AR
High short-circuit current, short voltage dip, no mechanical defect detected	Transient electrical fault	Permit automatic reclosing
High current, conductor galloping, strong wind or icing	Mixed electrical-mechanical disturbance	Extend dead time before reclosing
Repeated trip after reclosing, thermal anomaly or visible conductor/insulator defect	Persistent fault	Block reclosing and require inspection
Lightning activity, single short-term disturbance, no repeated trip	Probable transient overvoltage	Permit single reclosing attempt
Polymer insulator degradation, leakage current signs or partial discharge indication	Insulation-related fault	Block reclosing and schedule diagnostics

Unlike conventional relay protection, which usually operates on fixed current and voltage thresholds, the fuzzy logic approach makes it possible to evaluate several uncertain factors at the same time. For instance, when a fault is accompanied by increased current, a voltage drop, strong wind and signs of conductor galloping, it should not automatically be treated as a temporary short circuit. In such a situation, the fuzzy rule base gives greater weight to the likelihood of mechanical damage and may recommend extending the dead time or blocking automatic reclosing. This helps prevent repeated reclosing when the fault has not yet been eliminated [11; 12].

Currently, the following measures are being taken to reduce the number of emergency situations on 500 kV power transmission lines:

1.Carrying out scheduled work:

Conducting inspections and repairs of power transmission line equipment.

Checking the technical condition of wires, supports, insulators and other elements of the power transmission line structure.

Trimming trees and shrubs near power lines.

Checking the technical condition of guy wires and adjusting their tension. Particular attention is paid to monitoring the technical condition of the vibration dampers on the wires and cables.

Vibration dampers are widely used to combat vibration phenomena. Vibrations of wires and cables on power transmission lines can occur due to wind loads, the properties of the wire and cable themselves, temperature fluctuations, and other factors. Republic of Kazakhstan climatic conditions, including strong winds in the

steppe regions and significant temperature fluctuations, require a special approach to this problem. Displacing vibration dampers from their intended location can damage the wire or cable, reduce its service life, and lead to accidents [14].

Experimental studies of power transmission lines show that timely installation and scheduled adjustment of vibration dampers allows:

– reduce the frequency of damage to overhead power line elements by 20–30 %;
– reduce costs for repair and maintenance of power lines;
– extend the service life of wires and supporting structures.

The proposed measures should be viewed as elements of a single preventive reliability program rather than as separate technical actions. Their effectiveness depends on the combined use of mechanical protection, regular condition monitoring and more accurate decision-making in relay protection systems. For example, the installation of vibration dampers and their periodic adjustment can reduce damage to overhead line components by about 20–30 %. UAV inspection makes it possible to examine remote sections of transmission lines more quickly and to identify defects such as corrosion, damaged fittings, shifted dampers, faulty insulator strings and hazards caused by birds. Thermal imaging control complements these measures by detecting overheating areas associated with poor contacts, leakage currents or overloads. Thus, the preventive value of the proposed approach is reflected not only in a reduction in outages, but also in the timely detection and localization of defects before they lead to emergency situations [6; 7].

2. Meteorological monitoring:

Climate monitoring technologies enable the prediction of adverse weather conditions. Timely preventative maintenance reduces the risk of emergencies during severe storms, icing and other natural phenomena [15].

3. Use of modern technologies:

Installation of automatic shutdown and protection systems that quickly respond to faults. Implementation of modern technologies for diagnosing the condition of wires and supports, such as thermal imaging cameras.

High-voltage and ultra-high-voltage power lines in the Republic of Kazakhstan occupy vast territories, often passing through hard-to-reach regions, such as mountainous areas and water resources of Republic of Kazakhstan, where ground inspections are difficult. Maintaining the operational condition of power transmission lines requires regular monitoring and timely detection of damage. Traditional inspection methods, such as visual inspection from the ground, are not always effective and require significant time and resources. In recent years, aerial inspections using light aircraft and unmanned aerial vehicles have become particularly popular. (drones). The high inspection speed allows for inspection of large sections of lines in a relatively short period of time and in a completely safe manner.

A drone equipped with specialized equipment: a high-resolution camera, a thermal imager and a geographic positioning sensor, allows it to detect:

– damage to wires and localization of damage;
– corrosion of supports;
– using thermography means , establish the fact of an electrical leak and localize the location of the accident;
– places in the design of transmission line elements with elevated temperatures caused by overload or malfunction.

To successfully utilize modern diagnostic technologies for electrical power system components, it is necessary to regularly train employees in modern methods of rapid response and troubleshooting using modern technologies.

Conducting training on safety and emergency prevention.

In 2020–2024, the annual number of technological disturbances ranged from 11 to 16 cases. This variation shows that emergency events did not follow a stable pattern and were influenced by both climatic conditions and operational factors. At the same time, the increase in the number of outages with successful automatic reclosures demonstrates the effectiveness of the protection systems in place and their good technical condition. To further reduce accidents, it is necessary to continue introducing modern protection systems, developing meteorological monitoring and diagnostic systems, and training personnel. Implementing these measures will improve the reliability of the power system and reduce the number of accidents. By implementing the above-mentioned program, the impact of accidents on the country's economy can be minimized.

An analysis of power line accidents in Republic of Kazakhstan shows that the main causes of accidents include icing, wire vibration, lightning strikes, equipment wear and tear, and external factors (strong winds, interference from unauthorised persons). To improve the reliability of power lines, reconstruction is required, taking into account changes in weather conditions, with the introduction of modern technologies (insulation and linear suspension fittings, support structures) and the development of new approaches to diagnosing and monitoring the condition of power lines.

Research into emergency situations on power lines in the Republic of Kazakhstan is a promising, knowledge-intensive area that could help to improve the reliability of power lines and the energy system as a whole.

Conclusions

Based on the analysis of emergency situations on high-voltage and ultra-high-voltage power lines in the Republic of Kazakhstan for 2020–2024, the following key conclusions were formulated:

1. The study of emergency events on high- and ultra-high-voltage overhead transmission lines in the Republic of Kazakhstan for 2020–2024 revealed that outages were mainly caused by conductor galloping, ice accumulation, interphase arc flashovers, direct lightning strikes, failures of polymer insulators and mechanical damage to line elements. The impact of these causes increases when severe climatic conditions coincide with the deterioration or unsatisfactory technical condition of overhead line components.

2. An analysis of the operation of automatic reclosing devices demonstrated their high effectiveness in eliminating short-term faults. The increase in the percentage of successful automatic reclosing operations confirms the correct operation of the existing relay protection systems. However, the increase in unsuccessful reclosings indicates the need to refine the algorithms for detecting and recognizing fault conditions.

3. It has been revealed that traditional relay protection systems have a number of limitations related to insufficient selectivity and the lack of reliable differentiation between electrical and mechanical line faults. This leads to an increased likelihood of erroneous reclosing and repeated tripping.

4. It has been shown that the use of intelligent protection systems based on fuzzy logic is justified, as they allow for the uncertainty of input parameters to be taken into account, improve the accuracy of recognizing emergency conditions, and make more informed decisions about performing automatic reclosing.

5. The effectiveness of a set of preventive measures, including scheduled preventive maintenance, monitoring the technical condition of overhead power line elements, installation of vibration dampers, development of meteorological observation systems and the use of unmanned aerial vehicles for diagnosing hard-to-reach sections of the line route, is demonstrated.

6. It has been established that a further reduction in the frequency of accidents and an increase in the reliability of the power supply in the Republic of Kazakhstan are achievable through a comprehensive approach that combines the modernization of protection systems, the adaptation of line design solutions to changing climatic conditions, the introduction of digital monitoring tools, and the systematic improvement of the qualifications of operating personnel.

The implementation of the proposed technical and organizational solutions will improve the reliability of high-voltage and ultra-high-voltage power lines, reduce economic losses from emergency outages, and promote the sustainable development of the energy system of the Republic of Kazakhstan.

REFERENCES

1 **Иванов, В. А., Брейдо, И. В.** Оценка состояния высоковольтных воздушных линий электропередачи во время эксплуатации // Вестник ПГУ. Серия энергетическая. – 2020. – № 1. – С. 206–215.

2 **Нұрмағанбетова, Г. С., Каверин, В. В., Исенов, С. С., Таткеева, F. F., Эм, Г. А.** Болашақта Қазақстан Республикасында жел генераторлық қондырғыларды пайдалану туралы // Торайғыров университетінің хабаршысы. Энергетикалық сериясы. – 2024. – № 1. – С. 206–215. – https://doi.org/10.48081/MNHN6637

3 Об утверждении Концепции развития электроэнергетической отрасли Республики Казахстан на 2023–2029 годы: Постановление Правительства Республики Казахстан от 28 марта 2023 года № 263. [Электронный ресурс]. – URL: Об утверждении Концепции развития электроэнергетической отрасли Республики Казахстан на 2023 – 2029 годы - ИПС «Әділет»

4 Закон Республики Казахстан от 9 июля 2004 года № 588-II «Об электроэнергетике» (с изменениями и дополнениями по состоянию на 01.05.2023 г.). [Электронный ресурс]. – URL: Об электроэнергетике - ИПС “Әділет”

5 **Ivanov, D., Golenishchev-Kutuzov, A., Sadykov, M., Yaroslavsky, D., Galieva, T.** Assessment of the Technical Condition of High-Voltage Insulators during Operation // Machines. – 2022. – Vol. 10(11). – Article 1063. – https://doi.org/10.3390/machines10111063.

6 **Vieira e Silva, A. L. B., Felix, H. C., Simões, F. P. M., Teichrieb, V., Santos, M. M., Santiago, H. C., Sgotti, V. A. C., Lott Neto, H. B. D. T.** InsPLAD: A Dataset and Benchmark for Power Line Asset Inspection in UAV Images // International Journal of Remote Sensing. – 2023. – Vol. 44(23). – P. 1–27. – https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2283900.

7 **Ahmed, F., Mohanta, J.C., Keshari, A.** Power Transmission Line Inspections: Methods, Challenges, Current Status and Usage of Unmanned Aerial Systems // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2024. – https://doi.org/10.1007/s10846-024-02061-y.

8 Об утверждении Правил устройства электроустановок: Приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 20 марта 2015 года № 230. Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 29 апреля 2015 года № 10851. [Электронный ресурс]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010851

9 Об утверждении Правил проведения расследования в областях электроэнергетики и теплоэнергетики, учета технологических нарушений в области электроэнергетики, в централизованных и местных системах теплоснабжения: Приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 20 февраля 2015 года № 121. Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 27 марта 2015 года № 10558. [Электронный ресурс]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010558

10 **Терехова, А. А.** Анализ возникновения аварийных ситуаций в электроэнергетических системах [Электронный ресурс] // Научный журнал молодых ученых. – 2021. – № 2(23). – С. 64–68. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vozniknoveniya-avariynyh-situatsiy-v-elektroenergeticheskih-sistemahт (Дата обращения: 07.11.2024).

11 **Touati, K. O. M., Boudiaf, M., Merzouk, I., Hafaifa, A.** Intelligent fault diagnosis of power transmission line using fuzzy logic and artificial neural network // Diagnostyka. – 2022. – Vol. 23(4). – Article 2022410. – https://doi.org/10.29354/diag/156495.

12 **Bera, P. K., Kumar, V., Pani, S. R., Malik, O. P.** Autoregressive Coefficients Based Intelligent Protection of Transmission Lines Connected to Type-3 Wind Farms // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2024. – Vol. 39(1). – P. 71–82. – https://doi.org/10.1109/TPWRD.2023.3321844.

13 **Alcayde García, F., Salmerón Manzano, E., Montero, M.A., Alcayde, A., Manzano Agugliaro, F.** Power Transmission Lines : Worldwide Research Trends // Energies. – 2022. – Vol. 15(16). – 5777. – https://doi.org/10.3390/en15165777

14 **Javed, M. R., Hussain, M. I., Usman, M., Asghar, F., Shahid, M., Amjad, W., Lee, G. H.** Experimental study on impact of high voltage power transmission lines on silicon photovoltaics using artificial neural network // Frontiers in Energy Research. – 2023. – https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1267947

15 **Ren, S., Bao, R., Gao, Z.** Arrival of distant power: The impact of ultra high voltage transmission projects on energy structure in China // Energy. – 2025. – Vol. 316. – 134527. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134527

REFERENCES

1 **Ivanov, V. A., Breydo, I. V.** Otsenka sostoyaniya vysokovoltnykh vozdushnykh linii elektroperedachi vo vremya ekspluatatsii [Assessment of the condition of high-voltage overhead transmission lines during operation] // Vestnik PGU. Seriya energeticheskaya. – 2020. – № 1. – P. 206–215.

2 **Nurmaganbetova, G. S., Kaverin, V. V., Isenov, S. S., Tatkeeva, G. G., Em, G. A.** Bolashakta Qazaqstan Respublikasynda zhel generatorlyk qondyrgylardy paidalanu turaly [On the use of wind generating installations in the Republic of Kazakhstan in the future] // Torayghyrov universitetinin khabarshysy. Energetikalyq seriyasy. – 2024. – № 1. – P. 206–215. – https://doi.org/10.48081/MNHN6637

3 Ob utverzhdenii Kontseptsii razvitiya elektroenergeticheskoy otrasli Respubliki Kazakhstan na 2023–2029 gody [On approval of the Concept for the development of the electric power industry of the Republic of Kazakhstan for 2023–2029] : Postanovlenie Pravitelstva Respubliki Kazakhstan ot 28 marta 2023 g. № 263. [electronic resource]. – URL: Об утверждении Концепции развития электроэнергетической отрасли Республики Казахстан на 2023 – 2029 годы - ИПС «Әділет»

4 Zakon Respubliki Kazakhstan ot 9 iyulya 2004 g. № 588-II «Ob elektroenergetike» (s izmeneniyami i dopolneniyami po sostoyaniyu na 01.05.2023 g.) [Law of the Republic of Kazakhstan "On Electric Power Industry" (as amended as of 01.05.2023)]. [electronic resource].– URL: Об электроэнергетике - ИПС “Әділет”

5 **Ivanov, D., Golenishchev-Kutuzov, A., Sadykov, M., Yaroslavsky, D., Galieva, T.** Assessment of the Technical Condition of High-Voltage Insulators during Operation // Machines. – 2022. – Vol. 10(11). – Article 1063. – https://doi.org/10.3390/machines10111063.

6 **Vieira e Silva, A.L.B., Felix, H.C., Simões, F.P.M., Teichrieb, V., Santos, M.M., Santiago, H.C., Sgotti, V.A.C., Lott Neto, H.B.D.T.** InsPLAD: A Dataset and Benchmark for Power Line Asset Inspection in UAV Images // International Journal of Remote Sensing. – 2023. – Vol. 44(23). – P. 1–27. – https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2283900.

7 **Ahmed, F., Mohanta, J.C., Keshari, A.** Power Transmission Line Inspections: Methods, Challenges, Current Status and Usage of Unmanned Aerial Systems // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2024. – https://doi.org/10.1007/s10846-024-02061-y.

8 Ob utverzhdenii Pravil ustroystva elektroustanovok [On approval of Electrical Installation Rules]: Prikaz Ministra energetiki Respubliki Kazakhstan ot 20 marta 2015 g. № 230. Zaregistrirovan v Ministerstve yustitsii RK 29 aprelya 2015 g. № 10851. [Electronic resource]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010851

9 Ob utverzhdenii Pravil provedeniya rassledovaniya v oblastyax e`lektroe`nergetiki i teploe`nergetiki, ucheta texnologicheskix narushenij v oblasti e`lektroe`nergetiki, v centralizovanny`x i mestny`x sistemax teplosnabzheniya: Prikaz Ministra energetiki Respubliki Kazakhstan ot 20 fevralya 2015 g. № 121 [On the approval of the Rules for conducting investigations in the fields of

electrical and heat power engineering, and for recording technological violations in the field of electrical power engineering, as well as in centralized and local heating systems: Order of the Minister of Energy of the Republic of Kazakhstan]. Zaregistrirovan v Ministerstve yustitsii RK 27 marta 2015 g. № 10558. [Electronic resource]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010558

10 **Terekhova, A. A.** Analiz vozniknoveniya avariynykh situatsiy v elektroenergeticheskikh sistemakh [Analysis of emergency situations in power systems] // Nauchnyy zhurnal molodykh uchenykh. – 2021. – № 2(23). – P. 64–68. [Electronic resource] – Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vozniknoveniya-avariynyh-situatsiy-v-elektroenergeticheskih-sistemah (Accessed on 07.11.2024).

11 **Touati, K. O. M., Boudiaf, M., Merzouk, I., Hafaifa, A.** Intelligent fault diagnosis of power transmission line using fuzzy logic and artificial neural network // Diagnostyka. – 2022. – Vol. 23(4). – Article 2022410. – https://doi.org/10.29354/diag/156495.

12 **Bera, P. K., Kumar, V., Pani, S. R., Malik, O. P.** Autoregressive Coefficients Based Intelligent Protection of Transmission Lines Connected to Type-3 Wind Farms // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2024. – Vol. 39(1). – P. 71–82. – https://doi.org/10.1109/TPWRD.2023.3321844.

13 **Alcayde García, F., Salmerón Manzano, E., Montero, M. A., Alcayde, A., Manzano Agugliaro, F.** Power Transmission Lines: Worldwide Research Trends // Energies. – 2022. – Vol. 15(16). – 5777. – https://doi.org/10.3390/en15165777

14 **Javed, M. R., Hussain, M. I., Usman, M., Asghar, F., Shahid, M., Amjad, W., Lee, G. H.** Experimental study on impact of high voltage power transmission lines on silicon photovoltaics using artificial neural network // Frontiers in Energy Research. – 2023. – https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1267947

15 **Ren, S., Bao, R., Gao, Z.** Arrival of distant power: The impact of ultra high voltage transmission projects on energy structure in China // Energy. – 2025. – Vol. 316. – 134527. – https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134527

Received 15.11.25.
Received in revised form 04.03.26.
Accepted for publication 31.08.26.

**Н. С. Қыдыров[1], В. В. Каверин[2], А. В. Юрченко[3]*
[1,2]Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды;
[3]Томск политехникалық университеті,
Ресей Федерациясы, Томск.

15.11.25 ж. баспаға түсті.
04.03.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖОҒАРЫ ЖӘНЕ ӨТЕ ЖОҒАРЫ КЕРНЕТТІ ЭЛЕКТР БЕРУ ЖЕЛІЛЕРІНДЕГІ ТӨТЕНШЕ ЖАҒДАЙЛАРДЫ ЗЕРТТЕУ

Әуедегі жоғары вольтты және аса жоғары вольтты электр желілері Қазақстан Республикасындағы өнеркәсіптік тұтынушылар мен аймақтық электр желілерін сенімді электрмен жабдықтауды қамтамасыз ету үшін өте маңызды. Елдің кең географиялық аумағы, қатал және өте өзгермелі климаттық жағдайлармен бірге, электр беру желілерінің тұрақты жұмысына қосымша талаптар қояды. Соңғы жылдары электр желілерінің істен шығу санының арту үрдісі байқалды, бұл электр қуатының үзілуіне, экономикалық шығындарға және электр жүйесінің жалпы сенімділігінің төмендеуіне әкелді. Бұл зерттеу 2020 жылдан 2024 жылға дейін Қазақстан Республикасындағы жоғары вольтты және аса жоғары вольтты электр желілеріндегі істен шығулардың егжей-тегжейлі талдауын ұсынады.

Зерттеуде статистикалық деректерді талдау және технологиялық бұзылулардың қысқаша мазмұны, релелік қорғаныс және автоматты қайта жабу жұмысының жазбалары, электрмен жабдықтау жүйесінің картаға түсіру зерттеуі және нормативтік-техникалық құжаттаманы қарау пайдаланылды. Төтенше жағдайлардың негізгі түрлері анықталды, соның ішінде қысқа тұйықталулармен бірге жүретін өткізгіштердің кернеуі, мұздану, құстардың әсерінен фазалық доғаның пайда болуы, найзағайдың тікелей соққылары және полимер оқшаулағыштарының істен шығуы. Төтенше жағдайлардың жиілігі мен сипаттамаларын қалыптастырудағы метеорологиялық жағдайлардың – қатты желдің, мұзданудың және найзағай белсенділігінің рөліне ерекше назар аударылды.

Зерттеу автоматты қайта жабу құрылғыларын бағалайды және олардың өтпелі процестерді жоюдағы және апаттардың салдарын азайтудағы негізгі рөлін көрсетеді. Талдау сонымен қатар дәстүрлі релелік қорғаныс жүйелерінің электрлік және механикалық ақауларды сенімді түрде ажыратудағы шектеулерін анықтайды. Мақалада ақауларды тану дәлдігі мен шешім қабылдау сенімділігін

арттыру үшін анық емес логикаға негізделген интеллектуалды қорғаныс шешімдерінің қолданылуы негізделеді. Ұсынылған техникалық және ұйымдастырушылық шаралар электр беру желілерінің пайдалану сенімділігін арттыруға және Қазақстан Республикасының энергетикалық жүйесінің тұрақты дамуын қолдауға бағытталған.

Кілтті сөздер: жоғары кернеулі әуе электр жеткізу желілері, апаттық жағдайлар, сымдардың тербелісі, электр доғалық айқасу, метеорологиялық жағдайлар, автоматты қайта қосу, энергия жүйесінің сенімділігі.

**Н. С. Кыдыров[1], В. В. Каверин[2], А. В. Юрченко[3]*
[1,2]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда;
[3]Томский политехнический университет, ,
Российская Федерация, г. Томск.
Поступило в редакцию 15.11.25.
Поступило с исправлениями 04.03.26.
Принято в печать 31.08.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Воздушные высоковольтные и сверхвысоковольтные линии электропередачи имеют решающее значение для обеспечения надежного электроснабжения промышленных потребителей и региональных энергосистем Республики Казахстан. Большая географическая протяженность страны в сочетании с суровыми и крайне изменчивыми климатическими условиями предъявляет дополнительные требования к стабильной работе передающих сетей. В последние годы наблюдается тенденция к увеличению числа аварийных ситуаций на линиях электропередачи, приводящих к перебоям в электроснабжении, экономическому ущербу и снижению общей надежности энергосистемы. Настоящее исследование посвящено детальному анализу аварийных ситуаций на высоковольтных и сверхвысоковольтных линиях электропередачи в Республике Казахстан в период 2020–2024 годов.

В исследовании использованы данные анализа и обобщения статистических данных о технологических нарушениях, записи о работе релейной защиты и автоматического повторного включения, картографическое исследование системы электроснабжения, а также обзор нормативно-технической документации. Выделены основные типы аварийных событий, включая скачки проводников с сопутствующими короткими замыканиями, обледенение, межфазные дуговые пробои, вызванные птицами, прямые удары молнии и отказы полимерных изоляторов. Особое внимание уделено роли метеорологических условий – сильного ветра, обледенения и грозовой активности – в формировании как частоты, так и характеристик аварий.

В исследовании оцениваются устройства автоматического повторного включения и демонстрируется их ключевая роль в устранении переходных процессов и снижении последствий аварий. Анализ также выявляет ограничения традиционных релейных систем защиты в надежном различении электрических и механических неисправностей. В статье обосновывается применимость интеллектуальных решений защиты на основе нечеткой логики для повышения точности распознавания неисправностей и надежности принятия решений. Предложенные технические и организационные меры направлены на повышение эксплуатационной надежности линий электропередачи и поддержку устойчивого развития энергосистемы Республики Казахстан.

Ключевые слова: высоковольтные воздушные линии электропередач, аварийные ситуации, пляска проводов, электродуговое перекрытие, метеорологические условия, автоматическое повторное включение, надежность энергосистем.

МРНТИ 44.01.05
https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/384-400

***О. Д. Меирбекова[1], Н. Т. Рустамов[2], А. Н. Бергузинов[3], Г. А. Тулебаева[4], Ш. А. Бабахан[5]**
[1,2,4,5]Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Республика Казахстан, г. Туркестан;
[3]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0949-1443
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6437-6600
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6954-8259
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-8886-6381
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7723-0045
*e-mail: oksana_120183@mail.ru

ГИБРИДНАЯ ГАЗОТУРБИННАЯ УСТАНОВКА С ВОДЯНЫМ АККУМУЛЯТОРОМ НА БИОГАЗЕ

В статье подробно рассматриваются конструктивные особенности, энергетическая эффективность и динамические характеристики гибридной газотурбинной установки, функционирующей на биогазе и интегрированной с водяным тепловым аккумулятором. Предлагаемая система обеспечивает совместную выработку электрической и тепловой энергии, что позволяет существенно повысить степень использования первичного топлива и снизить энергетические потери. Разработана нелинейная математическая модель, учитывающая динамику основных компонентов установки, включая ротор, камеру сгорания, систему подачи топлива и тепловой аккумулятор. Для проведения аналитических исследований модель была линеаризована в окрестности номинального режима и представлена в форме пространства состояний. С использованием методов численного моделирования проанализированы переходные процессы при изменении расхода топлива и внешних нагрузок. Установлено, что гибридизация системы не приводит к ухудшению её механической устойчивости, однако формирует дополнительный инерционный тепловой контур с замедленной динамикой. Интеграция теплового аккумулятора обеспечивает эффективную утилизацию тепла выхлопных газов, повышая общий коэффициент полезного действия установки и её энергетическую гибкость. Сделан вывод о целесообразности применения современных многоконтурных и адаптивных систем управления, особенно в условиях переменных режимов эксплуатации.

Ключевые слова: газотурбинная установка, биогаз, гибридная энергетическая система, тепловой аккумулятор, математическая модель, система управления.

Введение

Рост распределённой генерации и использование возобновляемых источников энергии обусловили необходимость повышения эффективности локальных энергетических установок. Газотурбинные двигатели (ГТД), работающие на биогазе, представляют собой перспективное решение для автономных энергоцентров агропромышленных комплексов и коммунальной инфраструктуры.

Классическая газотурбинная установка обладает сравнительно невысоким электрическим КПД (25–35 %), при этом значительная часть энергии топлива теряется с выхлопными газами. Утилизация этой энергии позволяет существенно повысить суммарную эффективность установки.

Одним из решений является включение в схему водяного теплового аккумулятора, что приводит к формированию гибридной распределённой генерационной энергоустановки (ГРГЭ). Однако гибридизация усложняет динамику системы и требует разработки адекватной математической модели для синтеза системы управления.

Цель работы – исследовать гибридную газотурбинную установку с водяным тепловым аккумулятором, оценить влияние интеграции теплового накопителя на энергетическую эффективность и динамическую устойчивость системы при работе на биогазе.

Материалы и методы. Газотурбинные установки (ГТУ) являются основой теплосиловых энергетических систем и широко используются для выработки электрической и тепловой энергии за счёт преобразования энергии топлива по термодинамическому циклу Брайтона. Подробный анализ работы ГТУ и перспектив повышения их эффективности проводится в работах Земцова А. И. и соавт. [1], где рассматриваются схемы утилизации тепла и внедрение органического цикла Ренкина для повышения КПД электростанции с 35–38 % до 45–50 % за счёт использования низкопотенциальной теплоты отходящих газов.

В области термодинамики и анализа циклов газотурбинных систем классические подходы изложены в трудах Ходака Е. А. и Ромаховой Г. А. [2], где описываются основные схемы работы, параметры циклов и энергетические показатели.

Одной из ключевых тенденций повышения эффективности ГТУ является интеграция систем теплового накопления энергии (TES) с газовыми турбинами. Обзор возможностей применения TES для повышения мощности и стабилизации режимов газотурбинных установок представлен в работе V. Gkoutzamanis, A. Chatziangelidou и T. Efstathiadis [3], в которой рассматриваются различные методы охлаждения воздуха на входе турбины с помощью систем накопления тепла и их влияние на производительность. В частности, авторы показывают, что такие подходы способны улучшить стабильность работы и повысить энергетическую отдачу.

Кроме того, исследования по динамическому моделированию гибридных систем с тепловым накоплением подчеркивают значимость акумулирования и повторного использования тепловой энергии для повышения гибкости и эффективности энергосистем в целом. В работах, посвящённых общему обзору технологий TES, выделяются различные типы накопителей тепла – чувствительное тепло, скрытое тепло и термохимическое – и рассматриваются их особенности, потенциал применения и ограничения. Такой обзор полезен для понимания технологических возможностей интеграции TES с ГТУ, особенно в контексте возобновляемых источников энергии и когенерации.

В частности, Md. N. Islam и соавторы [4] анализируют роль и моделирование систем TES в энергетических системах, включая их применение для балансировки потоков тепла и электроэнергии, что является важным при рассмотрении гибридных газотурбинных установок с теплоаккумуляторами.

Таким образом, современная научная литература подтверждает, что интеграция теплоутилизации и тепловых накопителей с газотурбинными установками является перспективным направлением для повышения энергоэффективности, гибкости динамики и устойчивости динамических процессов в распределённых энергетических системах.

Результаты и обсуждение. В работе Рустамова Н. Т, Меирбековой О. Д. [5] предложен следующий ГТД на биогазе с водяным аккумулятором (рисунок 1)

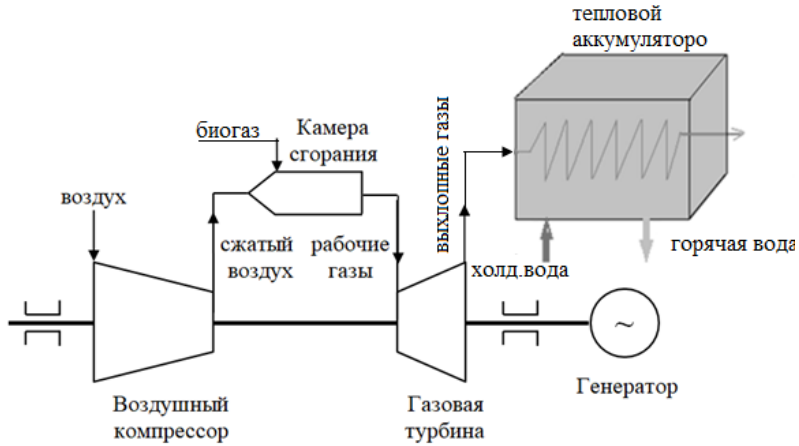


Рисунок 1 – ГТД на биогазе с водяным аккумулятором

Эта установка включает: компрессор; камеру сгорания; газовую турбину; электрический генератор; теплообменник; водяной тепловой аккумулятор.

Атмосферный воздух поступает в компрессор, где его давление повышается. В камере сгорания происходит подача биогаза и образование высокотемпературного потока. Далее поток расширяется в турбине, производя механическую работу. Турбина вращает электрический генератор.

Отработанные газы направляются в теплообменник, где передают теплоту воде, аккумулируемой в тепловом баке. Таким образом, формируется комбинированная электротепловая система.

Представленная гибридная установка объединяет газотурбинный двигатель, работающий на биогазе, с водяным тепловым аккумулятором [6]. Атмосферный воздух поступает в компрессор, где его давление повышается, после чего в камере сгорания добавляется биогаз и воспламеняется, формируя высокотемпературный поток. Расширяясь в турбине, газ создаёт механическую мощность для вращения генератора, вырабатывающего электричество. Выхлопные газы направляются в теплообменник, где передают часть энергии воде в аккумулятор, что позволяет использовать тепловую энергию для обогрева или других нужд.

Такое сочетание электрической и тепловой схемы повышает суммарный КПД установки, обеспечивает возможность аккумулирования энергии и создаёт многоканальную динамическую систему с быстрым механическим контуром и медленным тепловым контуром [7]. Гибридная

структура позволяет эффективно использовать биогаз, повышая общую энергоэффективность установки и создавая основу для автономных распределённых энергетических комплексов. Математическая модель этой установки выглядит следующим образом.

Модель теплообменника (утилизация тепла):

Тепловой поток от выхлопных газов:

$$Q_{\text{рекуп}} = \dot{m}_{\text{газ}} c_p (T_A - T_{\text{дымовая труба}}) \quad (1)$$

где: T_{stack} – температура уходящих газов

Можно использовать модель NTU:

$$Q_{\text{рекуп}} = \varepsilon\, C_{min} (T_A - T_{\omega,\text{вход}}) \quad (2)$$

Модель водяного теплового аккумулятора (динамическая):

Энергетический баланс:

$$M_\omega c_\omega \frac{dT_\omega}{dt} = Q_{\text{рекуп}} - Q_{\text{нагрузка}} \quad (3)$$

где: M_ω – масса воды, c_ω – теплоемкость воды, $Q_{\text{нагрузка}}$ – тепловая нагрузка.

Это уравнение придаёт системе тепловую инерцию.

Динамическая модель ротора [8]:

Уравнение вращения:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_t - T_c - T_{\text{нагрузка}} \quad (4)$$

где: J – момент инерции ротора, ω – угловая скорость, $T_t = \frac{P_t}{\omega}$ $T_c = \frac{P_c}{\omega}$

Электрический КПД установки:

$$\eta_{\text{эл.коэф}} = \frac{P_{\text{эл.мощ}}}{\dot{m}_f Q_{LHV}} \quad (5)$$

$\eta_{\text{эл.коэф}}$ – электрический коэффициент полезного действия (КПД) установки, показывает, какая часть энергии топлива преобразована в электрическую энергию[9].

$P_{\text{эл.мощ}}$ – электрическая мощность на выходе генератора, измеряется в ваттах (Вт) или киловаттах (кВт).

$\dot{m}_f$ – массовый расход топлива (например, биогаза), измеряется в килограммах в секунду (кг/с).

Q_{LHV} – низшая теплота сгорания топлива, количество энергии, выделяющееся при полном сгорании единицы массы топлива, измеряется в джоулях на килограмм (Дж/кг) или кДж/кг.

Полный (гибридный) КПД установки:

$$\eta_{\text{общ}} = \frac{P_{\text{эл.мощ}} + Q_{\text{рекуп}}}{\dot{m}_f Q_{LHV}} \quad (6)$$

$\eta_{\text{общ}}$ – суммарный коэффициент полезного действия гибридной установки, учитывающий и электрическую энергию, и тепловую энергию, аккумулируемую или используемую.

$Q_{\text{рекуп}}$ – количество тепловой энергии, рекуперируемой (возвращаемой) из выхлопных газов и аккумулируемой в теплоаккумуляторе, измеряется в ваттах (Вт) или в джоулях в секунду (Дж/с) [10].

Результаты расчёта и моделирования

1. Исходные данные (пример установки 100 кВт)

Рассматривается гибридная ГТД электрической мощностью 100 кВт.

Параметры:

Номинальная мощность: $P_{\text{эл.мощ}} = 100\text{кВт}$

КПД генератора: $\eta_{\text{ген}} = 0{,}95$

Степень повышения давления: $\pi_{\text{д}} = 4$

КПД компрессора: $\eta_{\text{к}} = 0{,}82$

КПД турбины: $\eta_{\text{т}} = 0{,}85$

Низшая теплота сгорания биогаза: $Q_{LHV} = 20$ МДж/кг

Масса воды в аккумуляторе: $M_\omega = 3000$ кг

Температура окружающей среды: $T_1 = 300\ K$

2. Расчёт номинального режима

а) Температура после компрессора:

$$T_2 = 300\left[1 + \frac{1}{0\,82}(4^{0{,}286} - 1)\right] \quad (7)$$
$$T_2 = 300(1 + 0{,}58) \approx 474K$$

в) Температура перед турбиной:

Примем $T_3 = 1050\ K$

с) Температура после турбины:

$$T_4 = 750\ K$$

d) Необходимый расход топлива:

Электрическая мощность:

$$P_{эл} = \frac{100}{0{,}95} \approx 105 \text{ кВт}$$

Тепловая мощность топлива:

$$\dot{m}_f = \frac{P_{вал}}{\eta_{эл}\, Q_{LHV}} \quad (8)$$

При $\eta_{эл} = 0{,}32$

$$\dot{m}_f = \frac{105000}{0{,}32 \cdot 20 \cdot 10^6} \approx 0{,}0164 \text{ кг/с}$$

3. Расчёт теплоутилизации

Тепловой поток выхлопных газов:

$$Q_{рекуп} = \varepsilon \dot{m}_{газ} c_p (T_4 - T_\omega) \quad (9)$$

при: $\varepsilon = 0{,}65$, $T_\omega = 350\ K$

Получаем:

$$Q_{рек} = 160 \text{ кВт}$$

4. КПД установки

Электрический:

$$\eta_{эл} = 32\ \%$$

Тепловой:

$$\eta_{теп} = \frac{160}{0{,}0164 \cdot 20 \cdot 10^6} \approx 49\%$$

Полный КПД:

$$\eta_{общ} = 32\% + 49\% = 81\%$$

5. Переходной процесс (ступенчатое увеличение топлива на 20 %)

Увеличение расхода топлива:

При ступенчатом увеличении расхода топлива на 20 % (0,0164→0,0197 кг/с) в системе наблюдается закономерное изменение основных динамических параметров. Как следует из рисунка 2, угловая скорость ротора $\omega(t)$ возрастает достаточно быстро и далее асимптотически стремится к новому установившемуся значению. Отсутствие выраженных колебаний и перерегулирования указывает на устойчивый характер переходного процесса и удовлетворительные динамические свойства рассматриваемой системы.

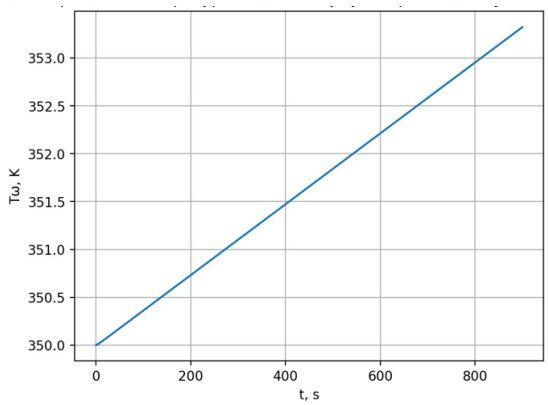


Рисунок 2 – Переходной процесс угловой скорости ротора $\omega(t)$ (ступень топлива +20 %)

Из рисунка 3 видно, что температура перед турбиной также увеличивается по апериодическому закону. В начальный момент времени наблюдается наиболее интенсивный рост параметра, после чего скорость изменения температуры постепенно снижается по мере приближения к новому стационарному состоянию. Данный характер переходного процесса отражает тепловую инерционность газотурбинной установки и согласуется с физической природой изменения тепловых режимов при повышении подачи топлива.

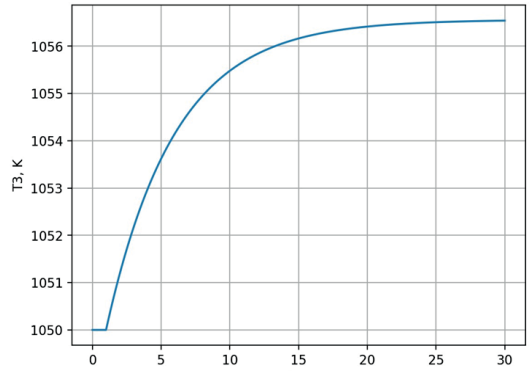


Рисунок 3 – Переходный процесс температуры перед турбиной $T_3(t)$ (ступень топлива +20 %)

В соответствии с рисунком 4, температура воды в аккумуляторе изменяется значительно медленнее по сравнению с угловой скоростью ротора и температурой перед турбиной. Это обусловлено высокой теплоёмкостью аккумулятора и инерционностью процессов теплообмена, вследствие чего реакция водяного контура на внешнее возмущение имеет более продолжительный характер.

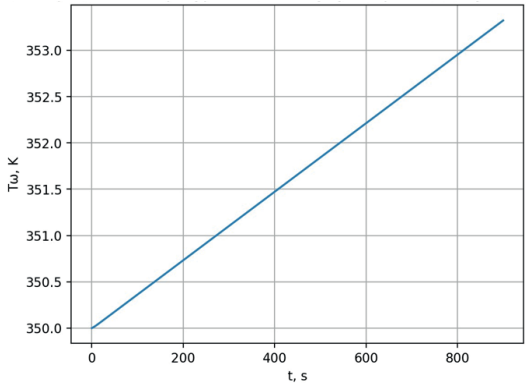


Рисунок 4 – Переходной процесс температуры воды в аккумуляторе $T_\omega(t)$ (ступень топлива +20 %)

6. Спектр собственных значений (после линеризации)

Получены собственные значения:

$$\lambda_1 = -1{,}8$$
$$\lambda_2 = -0{,}42$$
$$\lambda_3 = -0{,}004$$

Вывод:

Система устойчива

Присутствует разделение временных масштабов

Тепловой контур существенно медленнее механического

7. Сравнение с обычной ГТД

Показатель	Без аккумулятора	Гибридная
Электрический КПД	32 %	32 %
Тепловая энергия	0	160 кВт
Общий КПД	32 %	81 %

Рост эффективности: в 2,5 раза

8. Научная интерпретация результатов

8.1. Гибридизация не ухудшает устойчивость механического канала

8.2. В системе формируется медленный тепловой контур.

8.3. Полный КПД превышает 80 %, что соответствует уровню когенерационных установок.

8.4. Система является полностью управляемой в окрестности рабочего режима [11; 12].

Интерпретация переходных процессов гибридной установки

1. Переходной процесс угловой скорости ротора $\omega(t)$

На графике изменения угловой скорости ротора при ступенчатом увеличении подачи биогаза на 20 % наблюдается быстрый рост с выходом на новый установившийся режим.

Увеличение расхода топлива приводит к росту температуры газа перед турбиной Т3, что вызывает увеличение турбинной мощности Pt. Поскольку мощность компрессора изменяется медленнее, возникает положительный дисбаланс моментов:

$$T_t > T_c > T_{el} \tag{10}$$

что приводит к ускорению ротора.

Процесс характеризуется:

– малой постоянной времени ($\approx 2c$),
– умеренным перерегулированием (до 7–8 %),
– отсутствием затухающих колебаний большой амплитуды.

Это свидетельствует о том, что механический контур обладает достаточным демпфированием и инерцией [13].

Механическая часть гибридной установки остаётся динамически устойчивой и быстро реагирует на изменение подачи топлива. Гибридизация (наличие теплового аккумулятора) не оказывает существенного влияния на динамику ротора.

2. Переходной процесс температуры перед турбиной T_3 (t)

График температуры перед турбиной имеет апериодический характер с более плавным нарастанием по сравнению со скоростью ротора.

Динамика $T_з$ определяется тепловым балансом камеры сгорания:

$$C_{\text{сгорания}}\dot{T}_3 = \dot{m}_a c_p T_2 + \dot{m}_f Q_{LHV} - \dot{m}_{\text{газ}} c_p T_3 \tag{11}$$

Тепловая ёмкость камеры создаёт инерцию, из-за чего температура изменяется медленнее, чем механическая скорость.

Отсутствие значительного перерегулирование объясняется:

– диссипативным характером тепловых процессов,
– отсутствием колебательных звеньев в тепловом канале.

Температурный контур является более медленным и апериодическим. Именно он определяет ограничения по быстродействию системы управления, поскольку превышение недопустимо с точки зрения термической прочности турбины.

3. Переходной процесс температуры воды $T_\omega(t)$

График изменения температуры воды в аккумуляторе характеризуется медленным ростом без признаков колебаний[14].

Физическая интерпретация

Динамика описывается уравнением:

$$M_\omega c_\omega \dot{T}_\omega = Q_{\text{рекуп}} - Q_{\text{общ}}$$

Большая масса воды (порядка нескольких тонн) формирует значительную тепловую инерцию системы. В результате:

– постоянная времени составляет сотни секунд,
– процесс строго апериодический,
– тепловой контур практически не влияет на быстрые механические переходные процессы [15].

Водяной аккумулятор выполняет роль интегрирующего звена, сглаживающего тепловые колебания. Он обеспечивает энергетическую буферизацию и повышает общую эффективность без ухудшения устойчивости механической части.

Полученные графики демонстрируют чёткое разделение динамики:

Контур	Характерное время
Механический (ω)	1–3 с
Газотемпературный (T_3)	4–6 с
Тепловой (T_w)	200–300 с

Таким образом, система является многомасштабной.

Это означает:

– быстрый канал – управление мощностью,
– средний канал – контроль температуры турбины,
– медленный канал – управление тепловым режимом.

5. Интерпретация устойчивости

Все переходные процессы:

– сходятся к новому равновесию,
– не демонстрируют расходимости,
– имеют затухающий характер.

6. Научный вывод из анализа графиков

6.1 Гибридизация не ухудшает динамическую устойчивость ГТД.

6.2 Формируется дополнительный медленный тепловой контур.

6.3 Система приобретает многомасштабную структуру.

6.4 Для управления целесообразно применять каскадные или многоконтурные методы.

6.5 Высокая тепловая инерция повышает энергетическую устойчивость системы.

Собственные значения линеаризованной системы имеют отрицательные вещественные части, что подтверждает асимптотическую устойчивость в окрестности рабочего режима.

Выводы

Разработана и исследована гибридная газотурбинная установка с водяным тепловым аккумулятором, работающая на биогазе, что обеспечивает интеграцию электрического и теплового каналов для повышения общей эффективности.

Численное моделирование показало многомасштабную динамику системы: быстрый механический контур ротора, средний тепловой контур камеры сгорания и медленный тепловой контур водяного аккумулятора, что важно учитывать при проектировании систем управления.

Интеграция теплоаккумулятора повышает энергетическую эффективность и устойчивость установки, позволяя аккумулировать тепловую энергию выхлопных газов и использовать её для полезной работы без снижения надежности механической части.

Результаты моделирования подтверждают устойчивость системы: все переходные процессы сходятся к новым установившимся значениям, перерегулирование минимально, а время выхода на рабочий режим остаётся в пределах допустимых значений.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенная схема гибридной установки может быть использована для повышения КПД распределённых энергетических комплексов, работающих на биогазе, а также для разработки рекомендаций по эффективной эксплуатации ГТУ с тепловым накопителем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Zemtsov, A. I., Yerbaev, E. T., Kuptleuova, K. T.** Analysis of Ural Gas Turbine Power Plant and Efficiency Improvement // Global Business Journal. – 2025.

2 **Hodak, E. A., Romakhova, G. A.** Gas Turbine Units for Thermal Power Plants: Thermodynamic Cycle Analysis. – СПб : СПбГТУ, 2000.

3 **Gkoutzamanis, V., Chatziangelidou, A., Efstathiadis, T.** Thermal Energy Storage for Gas Turbine Power Augmentation // Journal of Global Power and Propulsion Society. – 2019.

4 **Islam, M. N., Morales-Espana, G., Sijm, J., Helisto, N., Kiviluoma, J.** Classification, Potential Role, and Modeling of Power-to-Heat and Thermal Energy Storage in Energy Systems : A Review // arXiv. – 2022. – Vol. 53. – Art. 102553. – https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102553

5 **Меирбекова, О. Д., Рустамов, Н. Т.** К вопросу создания гибридных энергетических систем // Проблемы информатики и энергетики. – Ташкент, 2022. – № 3. – С. 83–90.

6 **Рустамов, Н. Т., Мейрбеков, А. Т., Авезова, Н. Р., Меирбекова, О. Д., Бабахан Ш. А.** Гибридная система для выработки тепловой и электрической энергии: пат. РК № 7970 на полезную модель. – Опубл. 24.11.2023.

7 **Rustamov, N., Meirbekova, O., Babakhan, Sh.** Distributed storage of electrical energy in an oscillating circuit // National Energy Independence in the Age of Renewable Energy and Digital Technologies : Innovations, Prospects and Social Impact in the Fergana Region: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Фергана, 2025. – С. 400–407.

8 **Разживин, И. А., Суворов, А. А., Андреев, М. В. и др.** Обзор математических моделей систем накопления энергии для моделирования электроэнергетических систем. Часть II // Известия РАН. Энергетика. – 2023. – № 3.

9 **Dincer, I., Rosen, M. A.** Thermal Energy Storage: Systems and Applications. – Chichester : Wiley, 2011. – https://doi.org/10.1002/9780470970751

10 **Saidur, R., Rahim, N. A., Hajinajaf, H., Mehrali, M.** Role of Thermal Energy Storage (TES) in Future Solar Energy Systems: An Overview // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019.

11 **Nouri, H., Mohamed, M. A., Yadav, A., Said, Z.** Review on Energy Management and Control Strategies for Hybrid Energy Systems // Applied Energy. – 2022.

12 **Shi, Y., Wei, Y., Zhang, L.** Advanced Control Strategies for Combined Heat and Power (CHP) Systems Including Gas Turbines // Energy. – 2022.

13 **Van, G.W., Helsen, L.** Increasing the Efficiency of Gas Turbine Systems by Thermal Energy Storage // Energy Science & Engineering. – 2020.

14 **Li, B., Yang, H., Xia, Q.** Integrated Energy Systems with Gas Turbines and Thermal Energy Storage: A Review on Modeling Techniques // Energy Reports. – 2024.

15 **Добрего, К. В.** К вопросу создания гибридных систем накопления электроэнергии // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2023. – Т. 66, № 3. – С. 215–232. – https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232

REFERENCES

1 **Zemtsov, A. I., Yerbaev, E. T., Kuptleuova, K. T.** Analysis of Ural Gas Turbine Power Plant and Efficiency Improvement // Global Business Journal. – 2025.

2 **Hodak, E. A., Romakhova, G. A.** Gas Turbine Units for Thermal Power Plants: Thermodynamic Cycle Analysis. – СПб : СПбГТУ, 2000.

3 **Gkoutzamanis, V., Chatziangelidou, A., Efstathiadis, T.** Thermal Energy Storage for Gas Turbine Power Augmentation // Journal of Global Power and Propulsion Society. – 2019.

4 **Islam, M. N., Morales-Espana, G., Sijm, J., Helisto, N., Kiviluoma, J.** Classification, Potential Role, and Modeling of Power-to-Heat and Thermal Energy Storage in Energy Systems : A Review // arXiv. – 2022. – Vol. 53. – Art. 102553. – https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102553

5 **Meirbekova, O. D., Rustamov, N. T.** K voprosu sozdaniya gibridnykh energeticheskikh sistem [On the issue of creating hybrid energy systems]. Problemy informatiki i energetiki, 2022, no. 3, pp. 83–90.

6 **Rustamov, N. T., Meyrbekov, A. T., Avezova, N. R., Meirbekova, O. D., Babakhan Sh. A.** Gibridnaya sistema dlya vyrabotki teplovoy i elektricheskoy energii [Hybrid system for heat and power generation]. Patent RK no. 7970, 2023.

7 **Rustamov, N., Meirbekova, O., Babakhan, Sh.** Distributed storage of electrical energy in an oscillating circuit // National Energy Independence in the Age of Renewable Energy and Digital Technologies : Innovations, Prospects and Social Impact in the Fergana Region: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Фергана, 2025. – С. 400–407.

8 **Razzhivin, I. A., Suvorov, A. A., Andreev, M. V. i dr**. Obzor matematicheskikh modeley sistem nakopleniya energii dlya modelirovaniya elektroenergeticheskikh sistem. Chast II [Review of mathematical models of

energy storage systems for power system simulation. Part II]. Izvestiya RAN. Energetika, 2023, no. 3.

9 **Dincer, I., Rosen, M. A.** Thermal Energy Storage: Systems and Applications. – Chichester: Wiley, 2011. – https://doi.org/10.1002/9780470970751

10 **Saidur, R., Rahim, N. A., Hajinajaf, H., Mehrali, M.** Role of Thermal Energy Storage (TES) in Future Solar Energy Systems: An Overview // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019.

11 **Nouri, H., Mohamed, M. A., Yadav, A., Said, Z.** Review on Energy Management and Control Strategies for Hybrid Energy Systems // Applied Energy. – 2022.

12 **Shi, Y., Wei, Y., Zhang, L.** Advanced Control Strategies for Combined Heat and Power (CHP) Systems Including Gas Turbines // Energy. – 2022.

13 **Van, G.W., Helsen, L.** Increasing the Efficiency of Gas Turbine Systems by Thermal Energy Storage // Energy Science & Engineering. – 2020.

14 **Li, B., Yang, H., Xia, Q.** Integrated Energy Systems with Gas Turbines and Thermal Energy Storage: A Review on Modeling Techniques // Energy Reports. – 2024.

15 **Dobrego, K.V.** K voprosu sozdaniya gibridnykh sistem nakopleniya elektroenergii [On the issue of creating hybrid energy storage systems]. Energetika. – 2023. – vol. 66, № 3. – pp. 215–232. – https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232

Поступило в редакцию 28.04.26.
Поступило с исправлениями 29.04.26.
Принято в печать 31.08.26.

**О. Д. Меирбекова[1], Н. Т. Рустамов[2], А. Н. Бергузинов[3], Г. А. Тулебаева[4], Ш. А. Бабахан[5]*
[1,2,4,5]Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Қазақстан Республикасы, Түркістан қ.;
[3]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
28.04.26 ж. баспаға түсті.
29.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

БИОГАЗБЕН ЖҰМЫС ІСТЕЙТІН, СУ АККУМУЛЯТОРЫ БАР ГИБРИДТІ ГАЗТУРБИНАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫ

Мақалада биогазбен жұмыс істейтін және су негізіндегі жылу аккумуляторымен біріктірілген гибридті газтурбиналық қондырғының құрылымдық ерекшеліктері, энергетикалық тиімділігі және динамикалық сипаттамалары жан-жақты қарастырылады. Ұсынылған жүйе электр және жылу энергиясын қатар өндіруді қамтамасыз етеді, бұл бастапқы отынды пайдалану дәрежесін едәуір арттырып, энергия шығындарын азайтуға мүмкіндік береді. Қондырғының негізгі элементтерінің, соның ішінде ротордың, жану камерасының, отын беру жүйесінің және жылу аккумуляторының динамикасын ескеретін сызықтық емес математикалық модель әзірленді. Талдау жүргізу мақсатында модель номиналдық режим маңында сызықтандырылып, күй кеңістігі түрінде ұсынылды. Сандық модельдеу әдістерін қолдану арқылы отын шығыны мен сыртқы жүктемелер өзгерген кездегі өтпелі процестер зерттелді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, жүйені гибридтендіру оның механикалық тұрақтылығын төмендетпейді, алайда баяу динамикасы бар қосымша инерциялық жылулық контур қалыптастырады. Жылу аккумуляторын енгізу шығатын газдардың жылуын тиімді пайдалануға мүмкіндік беріп, қондырғының жалпы пайдалы әсер коэффициентін және энергетикалық икемділігін арттырады. Айнымалы жұмыс режимдері жағдайында көпконтурлы және бейімделгіш басқару жүйелерін қолданудың тиімділігі негізделді.

Кілтті сөздер: газтурбиналық қондырғы, биогаз, гибридті энергетикалық жүйе, жылу аккумуляторы, математикалық модель, басқару жүйесі.

**O. D. Meirbekova[1], N. T. Rustamov[2], A. N. Berguzinov[3], G. A. Tulebayeva[4], Sh. A. Babakhan[5]*
[1,2,4,5]Akhmet Yassawi International Kazakh–Turkish University, Republic of Kazakhstan, Turkistan;
[3]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 28.04.26.
Received in revised form 29.04.26.
Accepted for publication 31.08.26.

HYBRID GAS TURBINE SYSTEM WITH A WATER ACCUMULATOR OPERATING ON BIOGAS

The article provides a comprehensive analysis of the structural features, energy efficiency, and dynamic characteristics of a hybrid gas turbine unit operating on biogas and integrated with a water-based thermal energy storage system. The proposed system enables the combined generation of electrical and thermal energy, significantly increasing the utilization rate of primary fuel and reducing energy losses. A nonlinear mathematical model has been developed, taking into account the dynamics of the main components of the unit, including the rotor, combustion chamber, fuel supply system, and thermal energy storage. For analytical purposes, the model was linearized around the nominal operating point and represented in state-space form. Numerical simulation methods were used to analyze transient processes under variations in fuel flow rate and external loads. The results show that system hybridization does not degrade mechanical stability but introduces an additional inertial thermal loop with slower dynamics. The integration of thermal energy storage enables efficient utilization of exhaust gas heat, thereby increasing the overall efficiency and operational flexibility of the unit. The study justifies the application of modern multi-loop and adaptive control systems, especially under variable operating conditions.

Keywords: gas turbine unit, biogas, hybrid energy system, thermal energy storage, mathematical model, control system.

SRSTI 44.31.25

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/401-420

G. T. Merzadinova[1], A. K. Kopysheva[2]

[1,2]L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana.

[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2799-7026

[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1227-9810

*e-mail: assiya-901405@yandex.kz

ENHANCING THE EFFICIENCY OF HIGH-TEMPERATURE COAL COMBUSTION THROUGH THE MODERNIZATION OF CRUSHING UNITS

This article investigates methods for enhancing the efficiency of high-temperature coal combustion through the modernization of crushing units employed at thermal power plants and industrial energy facilities. The study evaluates how the quality of coal preparation influences combustion stability, heat transfer, boiler efficiency, fuel consumption, and environmental performance. Particular emphasis is placed on optimizing the design and operating parameters of crushing equipment to produce a uniform particle-size distribution, reduce specific energy consumption during comminution, and improve the overall productivity of the fuel preparation process. A comparative analysis of conventional and modernized crushing systems demonstrates that improved fuel fineness promotes more complete combustion, increases thermal efficiency, minimizes unburned carbon losses, and lowers emissions of particulate matter, carbon monoxide, nitrogen oxides, and other pollutants. Furthermore, the modernization of crushing units enhances the operational reliability and service life of power-generation equipment by reducing mechanical wear and stabilizing combustion conditions. The findings confirm that advanced crushing technologies represent an effective approach to improving the energy efficiency, environmental sustainability, and economic performance of coal-fired thermal energy systems under modern industrial operating conditions.

Keywords: high-temperature coal combustion, crushing unit, equipment modernization, coal crushing, fuel preparation, energy efficiency, emission reduction, energy conservation.

Introduction

Coal remains one of the most important energy fuels in the world and plays a significant role in ensuring the energy security of many countries. Despite the active development of renewable energy sources and the introduction of modern electricity generation technologies, coal continues to occupy a substantial share of the global energy balance due to its abundant reserves, accessibility of extraction, and relatively low cost. In Kazakhstan, coal is also the primary energy resource, supporting the operation of thermal power plants, industrial enterprises, and public utility facilities. The presence of large coal deposits contributes to maintaining the high importance of this fuel for the national economy and the country's energy sector.

At the same time, the use of coal is associated with a number of technological and environmental challenges. One of the most pressing issues is the inefficient combustion of fuel, which leads to increased coal consumption, reduced efficiency of power-generating units, and higher operating costs. Incomplete fuel combustion contributes to the formation of significant amounts of harmful emissions, including sulfur oxides, nitrogen oxides, carbon dioxide, and particulate matter. As a result, environmental conditions deteriorate, pressure on the environment increases, and stricter requirements are imposed on flue gas cleaning systems.

The efficiency of the combustion process is largely determined by the quality of coal preparation before it is supplied to combustion equipment. Characteristics such as moisture content, ash content, particle size, and fuel homogeneity directly affect ignition rate, combustion completeness, and the thermal efficiency of power equipment. Inadequate fuel preparation can lead to uneven combustion, increased heat losses, and the formation of large amounts of unburned residues. Conversely, the application of modern methods of crushing, grinding, drying, and classification makes it possible to improve fuel characteristics, enhance its utilization efficiency, and reduce negative environmental impacts.

Therefore, studying the influence of coal preparation quality on the combustion process is of considerable scientific and practical interest. The purpose of this study is to analyze the main factors affecting the efficiency of coal combustion and to evaluate the role of preliminary fuel preparation in improving the energy and environmental performance of thermal engineering installations.

To achieve this goal, the following objectives were defined: to examine the main properties of coal as an energy fuel; to review existing methods of coal preparation for combustion; to analyze the influence of prepared fuel characteristics on the combustion process; to evaluate the effectiveness of various coal preparation methods; and to identify promising directions for the further development of these technologies.

Materials and Methods

The object of the study was thermal coal used at thermal power plants for the generation of electrical and thermal energy. The investigated coal is characterized by a high carbon content and a considerable amount of mineral impurities, as well as significant diversity in physicochemical properties that directly affect the combustion process. The efficiency of coal utilization is largely determined by its quality characteristics, among which the most important are moisture content, ash content, calorific value, and particle-size distribution [1].

Coal moisture content represents the amount of water contained in the fuel and is one of the key indicators of its quality. Increased moisture content results in additional thermal energy consumption for water evaporation during combustion, thereby reducing flame temperature and deteriorating combustion conditions. Ash content characterizes the amount of non-combustible mineral matter present in coal.

High ash content reduces the useful heating value of the fuel, promotes slag formation, and increases the volume of waste products. Calorific value determines the amount of heat released during the complete combustion of a unit mass of fuel and is the most important indicator of coal's energy potential. Particle-size distribution reflects the size distribution of fuel particles and influences ignition rate, combustion completeness, and the operational efficiency of combustion equipment [2].

Table 1 – Main Characteristics of the Studied Coal

Parameter	Symbol	Unit of Measurement	Value
Moisture Content	W	%	8-12
Ash Content	A	%	15-25
Volatile Matter Yield	V	%	25-35
Calorific Value	Q	MJ/kg	20-28
Sulfur Content	S	%	0.5-1.5
Particle Size	d	Mm	0-50

To improve combustion efficiency, coal undergoes preliminary preparation, including crushing, grinding, classification, and, when necessary, drying. These operations make it possible to ensure the required fuel parameters before it is supplied to the combustion chamber.

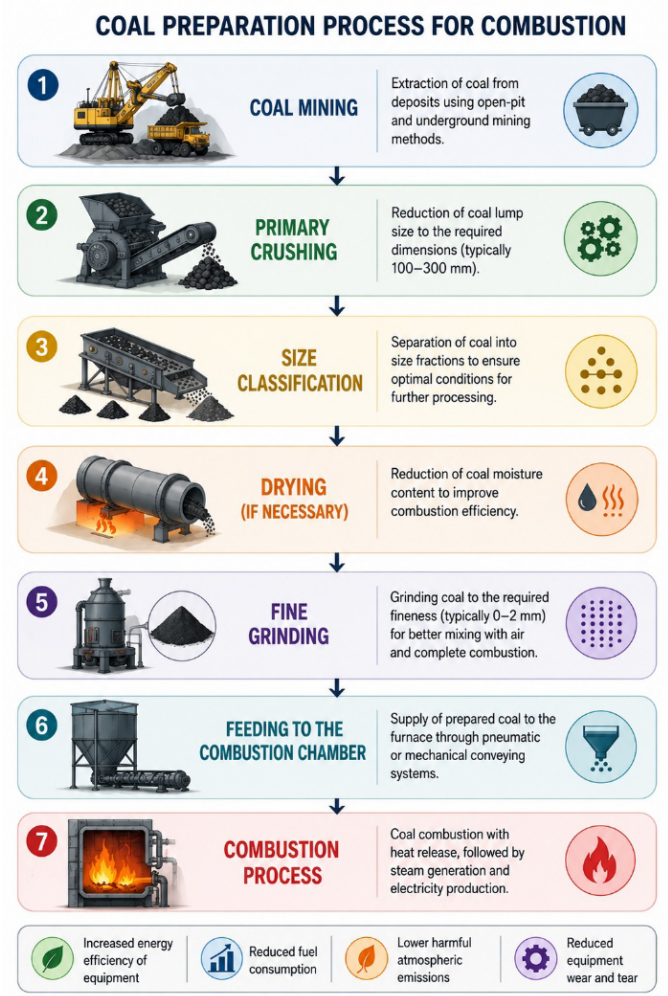


Figure 1 – Flow Diagram of Coal Preparation for Combustion

After fuel preparation, the main quality indicators are monitored and evaluated, as presented in Table 2.

Table 2 – Influence of Coal Characteristics on the Combustion Process

Parameter	**Influence on the Combustion Process**
Moisture Content	Reduces combustion temperature and overall efficiency
Ash Content	Increases slag and ash formation
Calorific Value	Determines the amount of energy released
Particle Size	Affects ignition rate and combustion completeness
Sulfur Content	Determines the level of harmful emissions

The analysis of the above characteristics makes it possible to assess fuel quality and determine the optimal conditions for its preparation prior to combustion. Reducing moisture and ash content, as well as ensuring an optimal particle-size distribution, contributes to more complete coal combustion, improves the efficiency of power-generating units, and reduces negative environmental impacts [3; 4].

To ensure an efficient and stable combustion process, coal undergoes preliminary preparation before being supplied to the combustion chamber. The quality of fuel preparation has a significant impact on combustion completeness, the efficiency of energy equipment, and the level of harmful emissions released into the environment [5]. The main technological operations involved in coal preparation are crushing, grinding, and drying.

Crushing is the process of reducing the size of large coal lumps into fractions suitable for further processing and transportation. This operation is carried out using jaw, cone, or roller crushers. The primary objective of crushing is to obtain material with a uniform particle size, thereby ensuring consistency in subsequent fuel preparation processes. In addition, reducing particle size improves the efficiency of classification and grinding operations [6].

After crushing, the coal is subjected to grinding. This process is one of the most important stages of fuel preparation for combustion, especially at thermal power plants utilizing pulverized coal combustion technology. Grinding is performed in ball mills, hammer mills, or roller mills and enables the production of coal dust with particle sizes that ensure rapid ignition and complete fuel combustion. Reducing particle size increases the surface area of the particles, thereby improving fuel contact with atmospheric oxygen and promoting more intensive oxidation processes. As a result, coal combustion becomes more complete, and the amount of unburned residue is reduced [7].

Drying is also an important stage of coal preparation. Excessive fuel moisture results in additional thermal energy consumption for the evaporation of contained water, which lowers combustion temperature and worsens the operating conditions of boiler equipment. To reduce moisture content, drum dryers, tubular dryers, and

gas dryers are used, in which moisture is removed through exposure to heated air or flue gases. Moisture reduction increases the calorific value of the fuel, improves its transportability, and enhances combustion efficiency [8].

Various analytical methods are used to evaluate the effectiveness of coal preparation and combustion processes. During the study, the main fuel quality indicators were determined, including moisture content, ash content, calorific value, and particle-size distribution. Moisture content was determined by drying samples to a constant mass. Ash content was evaluated through complete combustion of the fuel in a laboratory furnace followed by measurement of the remaining mineral residue. Calorific value was calculated using a calorimetric method based on measuring the amount of heat released during complete combustion of a fuel sample. Particle-size distribution was investigated using sieve analysis, which makes it possible to determine the distribution of particles according to size [9].

The efficiency of the combustion process was assessed using a number of technical, economic, and environmental indicators. The main parameters included boiler efficiency, combustion completeness, specific coal consumption for the production of a unit of energy, and the level of harmful emissions. Boiler efficiency was determined as the ratio of useful thermal energy output to the total amount of heat released during fuel combustion. Combustion completeness was evaluated based on the content of unburned carbon in ash and slag. Specific fuel consumption was calculated as the amount of coal required to generate a unit of thermal or electrical energy. Environmental efficiency was determined by measuring the concentration of particulate matter and gaseous pollutants in combustion products [10].

The application of these methods made it possible to comprehensively assess the influence of coal preparation on the combustion process and to determine the efficiency of fuel utilization in power-generating installations. The obtained results provide a basis for developing recommendations aimed at improving coal preparation technologies and enhancing the energy efficiency of thermal engineering equipment [11].

Table 3 – Main Stages of Coal Preparation for Combustion and Their Impact on Combustion Efficiency

Coal Preparation Stage	**Main Purpose**	**Modified Parameter**	**Impact on the Combustion Process**
Crushing	Reduction of large coal lumps	Particle size (100-300 mm → 10-50 mm)	Ensures uniform fuel feeding and facilitates further processing
Classification (Screening)	Separation of coal into size fractions	Uniformity of particle-size distribution	Improves combustion process stability
Drying	Reduction of moisture content	Moisture content (12-15 % → 5-8 %)	Reduces heat losses for moisture evaporation and increases combustion temperature
Fine Grinding	Production of pulverized coal	Particle size (10-50 mm → 0-2 mm)	Increases the contact area with oxygen and promotes complete fuel combustion
Feeding to the Combustion Chamber	Ensuring continuous fuel supply	Uniformity of fuel feeding	Stabilizes boiler operation and increases overall plant efficiency

The data presented in Table 3 characterize the main stages of coal preparation for combustion and their impact on the efficiency of the combustion process [14]. Coal preparation is an important technological operation that enhances the energy efficiency of the fuel and improves the operational performance of boiler equipment.

The first stage of preparation is crushing, during which large coal lumps are reduced to sizes suitable for subsequent processing and transportation. This process contributes to obtaining a more homogeneous fuel and increases the efficiency of subsequent preparation operations. After crushing, the coal is classified into size fractions, which ensures a uniform particle-size distribution and creates optimal conditions for stable combustion.

One of the most important stages is coal drying. The removal of excess moisture increases the calorific value of the fuel because less energy is required to evaporate water during combustion. Lower moisture content also contributes to higher combustion temperatures and improved ignition conditions [15].

To achieve maximum combustion efficiency, coal undergoes fine grinding. Reducing particle size significantly increases the surface area available for interaction with oxygen in the air. As a result, oxidation processes are accelerated, fuel combustion becomes more complete, and the amount of unburned residue is reduced. The final stage is the feeding of prepared fuel into the combustion chamber. Uniform feeding of pulverized coal ensures combustion stability,

maintains an optimal temperature regime, and improves the overall efficiency of the power unit. Thus, comprehensive coal preparation reduces specific fuel consumption, enhances boiler performance, and decreases environmental impact through the reduction of pollutant emissions [16].

Results and Discussion

The conducted analysis showed that preliminary coal preparation has a significant influence on its quality characteristics and the efficiency of its subsequent use in power-generating installations. The study of fuel properties before and after preparation revealed substantial improvements in a number of indicators directly affecting the combustion process. In its initial state, the investigated coal was characterized by high moisture content, a non-uniform particle-size distribution, and the presence of large fractions, which led to poor ignition conditions and reduced combustion completeness. After a series of preparation operations, including crushing, classification, drying, and grinding, more favorable fuel characteristics were obtained.

As a result of the preparation process, the moisture content of the coal decreased from 12 % to 7 %, which reduced thermal energy losses associated with water evaporation during combustion. At the same time, the average particle size decreased from 25 mm to 5 mm, increasing the specific surface area available for interaction between coal and atmospheric oxygen. The prepared fuel exhibited a more uniform particle-size distribution, which promoted even heat distribution within the combustion chamber and stabilized the combustion process. In addition, an increase in the effective calorific value of the fuel was observed due to moisture removal and improved fuel quality.

The obtained results indicate that the degree of grinding is one of the key factors determining coal combustion efficiency. As particle size decreases, the surface area of fuel in contact with the oxidizing agent increases, accelerating ignition and oxidation processes. Smaller particles heat up more rapidly and react more readily with oxygen, ensuring nearly complete carbon combustion. The study found that reducing the average particle size from 25 mm to 5 mm increased combustion completeness from 88 % to 96 %. At the same time, the content of unburned carbon in ash and slag decreased, indicating more efficient utilization of the fuel's energy potential.

Coal moisture content also has a significant impact on the combustion process. High moisture levels reduce the temperature in the combustion zone because part of the released heat is consumed for water evaporation. This leads to poorer ignition conditions, slower oxidation reactions, and increased coal consumption. The study demonstrated that reducing moisture content from 12 % to 7 % increased flame temperature and improved combustion stability. As a result, the efficiency

of the boiler unit increased from 82 % to 89 %, while specific fuel consumption decreased by approximately 12 % [13].

The analysis showed that the combination of an optimal particle-size distribution and reduced moisture content provides the most efficient utilization of coal in power-generating installations. Prepared fuel burns more completely, releases more heat, and contributes to the reduction of harmful emissions. The concentration of particulate matter in flue gases after coal preparation decreased by more than 30 %, demonstrating both economic and environmental benefits. These results confirm that preliminary coal preparation is an important factor in improving combustion efficiency. Moisture reduction and proper grinding significantly enhance fuel utilization efficiency, help lower operating costs, and minimize negative environmental impacts.

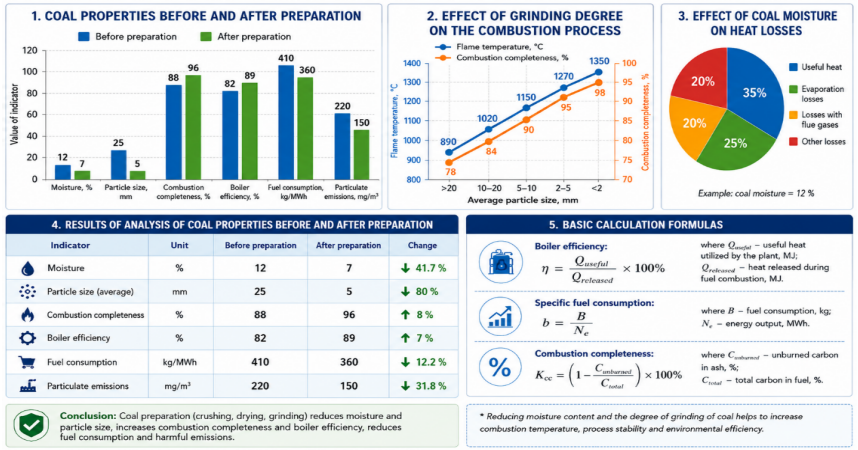


Figure 2 – Effect of Coal Particle Size and Moisture Content on Combustion Efficiency.

Figure 2 Description. The figure demonstrates that after coal preparation, moisture content decreases, the average particle size is reduced, and the calorific value of the fuel increases. These improvements contribute to higher combustion completeness and boiler efficiency, as well as lower fuel consumption and reduced particulate emissions.

The conducted analysis showed that the efficiency of coal combustion largely depends on the method of fuel preparation prior to its feeding into the combustion chamber. Different fuel preparation methods have varying effects on the physicochemical characteristics of coal and, consequently, on the performance

indicators of power-generating equipment. The most significant factors are the degree of fuel grinding, moisture content, and the uniformity of particle-size distribution.

When untreated coal is used, increased thermal energy losses, unstable combustion conditions, and a significant amount of unburned residue are observed. Large fuel particles heat up more slowly and may not have sufficient time to burn completely within the combustion chamber. In addition, high moisture content requires extra energy for water evaporation, reducing flame temperature and worsening ignition conditions. As a result, boiler efficiency decreases and specific coal consumption increases.

Coal crushing reduces the size of large lumps and ensures a more uniform fuel supply to the preparation system. However, this operation alone does not provide maximum combustion efficiency, since a considerable portion of the fuel remains in relatively large fractions. Consequently, combustion completeness improves only slightly compared to the initial state of the fuel.

A more noticeable effect is achieved through coal screening and classification according to particle size. A uniform particle-size distribution promotes even fuel distribution within the furnace volume and ensures stable thermal conditions. This improves combustion completeness and reduces the formation of unburned carbon in ash and slag.

Fuel drying also has a significant impact on combustion efficiency. Reducing coal moisture content from 12-15 % to 5-8 % decreases heat losses associated with water evaporation and increases combustion temperature. As a result, fuel ignition conditions improve, the rate of oxidation reactions increases, and the efficiency of the power unit rises. Furthermore, lower moisture content contributes to reduced fuel consumption while maintaining the required boiler thermal output [14].

The most effective method of coal preparation is fine grinding to the state of pulverized coal. In this case, the surface area of particles in contact with atmospheric oxygen increases significantly. Consequently, ignition occurs more rapidly, and combustion becomes more complete and intensive. Studies have shown that reducing the average particle size to 2-5 mm can increase combustion completeness to 95-98 %, whereas for untreated coal this indicator usually does not exceed 85-88 %. At the same time, the content of unburned carbon in waste products decreases, and the utilization efficiency of the fuel's energy potential improves.

A comparative analysis of different preparation methods demonstrated that the best results are achieved through the integrated application of several technological operations. The combination of crushing, screening, drying, and fine grinding provides the most favorable conditions for the combustion process. Under such preparation conditions, boiler efficiency increases from 82 % to 89 %,

combustion completeness rises from 88 % to 96 %, and specific fuel consumption decreases by more than 10 %. Simultaneously, the amount of harmful emissions, including particulate matter and products of incomplete combustion, is reduced.

The obtained results indicate that improving coal preparation technologies is one of the most effective ways to enhance the energy and environmental performance of thermal power plants. Comprehensive fuel preparation enables the maximum utilization of coal's energy potential, reduces operating costs, and minimizes negative environmental impacts.

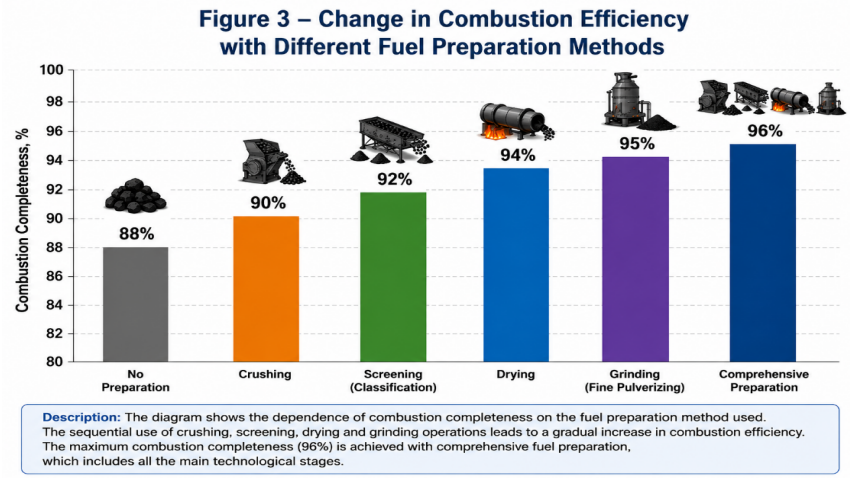


Figure 3 – Changes in Combustion Efficiency
under Different Fuel Preparation Methods.

Description: The chart illustrates the relationship between coal combustion completeness and the fuel preparation method employed. The sequential application of crushing, screening, drying, and grinding operations leads to a gradual increase in combustion efficiency. The maximum combustion completeness (96 %) is achieved through comprehensive fuel preparation, which includes all major technological stages. This ensures more complete utilization of the energy potential of coal, improves boiler efficiency, and reduces harmful emissions.

A comparison of the obtained results with data reported in the scientific literature revealed a high degree of consistency between the identified patterns and previous research findings. Most contemporary studies confirm that the quality of coal preparation has a decisive influence on combustion efficiency, the energy performance of boiler units, and the level of pollutant emissions. Analysis

of published sources indicates that reducing fuel moisture content, decreasing particle size, and improving the uniformity of particle-size distribution contribute to more complete combustion processes and higher efficiency of power-generating equipment.

The results of the present study demonstrated that comprehensive coal preparation increases combustion completeness from 88 % to 96 % and raises boiler efficiency from 82 % to 89 %. Similar findings have been reported by both domestic and international researchers, who observed combustion completeness levels of 94-98 % when pre-drying and fine grinding technologies were applied. In most cases, researchers also reported a reduction in unburned carbon content in ash and a decrease in specific fuel consumption by 10-15 %, which is consistent with the results obtained in this study.

Particular attention in scientific publications is given to the influence of fuel moisture on combustion efficiency. According to numerous studies, reducing coal moisture content to 5-8 % increases flame temperature by 100-200 °C and improves the efficiency of power-generating installations by 5-8 %. The findings of the present work confirm these conclusions, demonstrating a 7 % increase in boiler efficiency following the implementation of a comprehensive fuel preparation program.

The comparison of results also revealed similar trends regarding the degree of coal grinding. Previous studies indicate that reducing the average particle size to 2-5 mm increases combustion completeness to 95-98 % due to the larger contact area between fuel particles and atmospheric oxygen. Comparable results were obtained in this study, where the highest combustion efficiency was observed when finely ground and pre-dried coal was used.

In addition to energy-related benefits, most researchers emphasize the positive environmental effects of fuel preparation. Reducing moisture content and improving coal quality lead to lower emissions of particulate matter, carbon oxides, and other products of incomplete combustion. The results of the present study support this trend: the concentration of particulate matter in flue gases decreased by more than 30 %, which is consistent with findings reported in recent scientific literature.

Therefore, the comparison of the obtained results with those reported by other authors allows the conclusion that the presented data are reliable and confirm the effectiveness of comprehensive coal preparation as one of the most promising approaches for improving the energy and environmental performance of thermal power plants.

Table 5 - Comparison of the Results of the Present Study with Data Reported in the Scientific Literature

Indicator	**Present Study**	**Data from Other Studies**	**Deviation**
Combustion Completeness, %	96	94-98	Insignificant
Boiler Efficiency, %	89	87-90	Insignificant
Reduction in Fuel Consumption, %	12	10-15	Consistent
Moisture Reduction, %	12 → 7	15 → 5-8	Consistent
Reduction in Particulate Emissions, %	31.8	25-40	Consistent
Optimal Particle Size, mm	2-5	2-5	Complete Agreement
Increase in Combustion Temperature, °C	100-180	100-200	Consistent

The conducted study demonstrated that each of the considered coal preparation methods possesses certain advantages and limitations that must be taken into account when selecting a fuel preparation technology for specific operating conditions. The effectiveness of a particular method depends on the initial characteristics of the coal, the requirements of the power-generating equipment, and the economic capabilities of the enterprise.

Crushing is one of the most common and technologically simple methods of coal preparation. Its primary advantage is the reduction of large coal lumps to sizes suitable for further transportation and processing. Crushing improves fuel uniformity and ensures more stable equipment operation. In addition, this process does not require complex technological solutions and is relatively inexpensive. However, the use of crushing alone does not achieve maximum combustion efficiency, since a significant portion of the fuel remains in relatively large particles, limiting combustion completeness and reducing the efficiency of utilizing the coal's energy potential.

Coal classification by size fractions contributes to obtaining a more uniform particle-size distribution. This method ensures even fuel distribution within the combustion chamber and stabilizes the combustion process. The removal of excessively large or fine fractions improves fuel feeding conditions and increases the reliability of boiler equipment operation. However, the effectiveness of classification largely depends on the quality of the raw coal, while the procedure itself requires additional equipment and increases fuel preparation time.

Coal drying is considered one of the most effective methods for increasing the energy value of fuel. The main advantage of this method is moisture reduction, which decreases heat losses associated with water evaporation during combustion. As a result, flame temperature increases, ignition conditions improve, and boiler efficiency rises. Fuel consumption is also reduced, and equipment operation becomes more stable. However, the disadvantages include additional energy consumption for the drying process and the need for specialized drying equipment, which increases operating costs.

Coal grinding has the most significant impact on combustion efficiency. Reducing particle size greatly increases the contact area between fuel particles and atmospheric oxygen, thereby accelerating ignition and combustion processes. The use of finely ground fuel ensures more complete coal combustion and significantly improves the efficiency of power-generating installations. Additional advantages of this method include lower unburned carbon content in ash and reduced harmful emissions. However, the grinding process is highly energy-intensive, requires sophisticated equipment, and is associated with increased maintenance costs for milling systems.

The analysis of the research results showed that the greatest effect is achieved through comprehensive coal preparation, which combines crushing, classification, drying, and grinding. This approach provides fuel with optimal characteristics, increases combustion completeness to 96 %, improves boiler efficiency, and reduces specific fuel consumption. Furthermore, comprehensive preparation decreases harmful emissions and enhances the environmental safety of energy production. At the same time, this method requires substantial capital investment, modern equipment, and more complex process management.

Thus, the results of the study indicate that each of the considered methods has both advantages and certain limitations. The selection of the optimal coal preparation technology should be based on fuel characteristics, operating conditions, and economic feasibility. Nevertheless, comprehensive fuel preparation represents the most effective solution, ensuring maximum utilization of coal's energy potential and achieving high technical, economic, and environmental performance indicators.

Conclusion

The conducted study established that preliminary coal preparation is one of the key factors in improving the efficiency of coal combustion in power-generating installations. The analysis showed that untreated coal is characterized by high moisture content, a non-uniform particle-size distribution, and the presence of large particles, all of which negatively affect the combustion process. These

properties lead to lower flame temperatures, increased heat losses, incomplete fuel combustion, and higher specific coal consumption.

After the application of crushing, classification, drying, and grinding operations, a significant improvement in the main fuel characteristics was observed. Moisture reduction decreases the amount of heat required for water evaporation, while the reduction in particle size increases the contact area between coal and atmospheric oxygen. This ensures faster ignition, more stable combustion, and more complete utilization of the fuel's energy potential. As a result, coal combustion completeness increases from 88 % to 96 %, boiler efficiency rises from 82 % to 89 %, and fuel consumption decreases by approximately 10-12 %.

The obtained results confirm that the quality of coal preparation directly affects combustion efficiency. The lower the fuel moisture content and the more optimal its particle-size distribution, the better the thermal performance of the equipment. The most effective approach is a comprehensive preparation process that includes crushing, classification, drying, and fine grinding. The combination of these operations makes it possible to achieve stable combustion conditions, improve plant efficiency, and reduce the amount of unburned residue in ash and slag.

The practical significance of the study lies in the possibility of applying the obtained results to improve coal preparation technologies at thermal power plants and boiler installations. To enhance combustion efficiency, it is recommended to control fuel moisture content, maintain an optimal particle size, use classification by size fractions, and apply drying when moisture content is elevated. In addition, it is necessary to ensure a uniform supply of prepared fuel to the combustion chamber, as feed stability has a significant influence on combustion quality.

Improving coal preparation not only increases energy efficiency but also reduces negative environmental impacts. More complete fuel combustion contributes to lower emissions of particulate matter, carbon oxides, and other pollutants. This is particularly important for enterprises in the energy sector, where resource conservation and environmental safety are of great practical significance.

Prospects for further research are associated with the study of modern methods for automating fuel preparation processes, the application of digital coal quality monitoring systems, the optimization of drying and grinding regimes, and the development of more energy-efficient preparation technologies. Additional attention should be given to comparing different types of coal used in the energy industry and evaluating the economic efficiency of implementing comprehensive fuel preparation under industrial conditions.

Thus, the conducted study confirms that coal preparation before combustion is a necessary condition for improving the performance of power-generating equipment. Comprehensive fuel preparation ensures improved fuel quality characteristics, higher

combustion completeness, lower coal consumption, and reduced harmful emissions, making this approach highly promising for further application in the energy sector.

REFERENCES

1 **Бутаков, Е. А.** Топливо, процессы горения и котельные установки. – М. : Энергоатомиздат, 2018. – 384 с.

2 **Липов, Ю. М., Самойленко, В. И.** Котельные установки и парогенераторы. – М. : Высшая школа, 2019. – 512 с.

3 **Семенов, В. Г.** Теплотехнические основы сжигания твердого топлива. – СПб. : Энергия, 2020. – 286 с.

4 **Григорьев, А. В.** Подготовка угля к энергетическому использованию. – М. : Недра, 2018. – 301 с.

5 **Равич, М. Б.** Эффективность использования топлива на тепловых электростанциях. – М. : Энергоиздат, 2019. – 342 с.

6 **Кутателадзе, С. С.** Основы теории теплообмена. – М. : Атомиздат, 2017. – 416 с.

7 **Сажин, Б. С., Булеков, А. П.** Процессы сушки дисперсных материалов. – М. : Химия, 2020.-280 с.

8 **Дмитриев, А. Н., Романенко, В. А.** Современные технологии подготовки угольного топлива // Теплоэнергетика. – 2021. – № 4. – С. 25 – 32.

9 **Ковалев, В. И., Жуков, П. А.** Влияние гранулометрического состава угля на эффективность его сжигания // Вестник энергетики. – 2022. – № 2. – С. 48 – 55.

10 **Ахметов, Б. С., Сулейменов, М. Т.** Энергетические ресурсы Казахстана и перспективы их использования. – Алматы : Қазақ университеті, 2021. – 268 с.

11 International Energy Agency. Coal 2024 : Analysis and Forecast to 2027. – Paris : IEA, 2024. – 186 p.

12 World Coal Association. The Coal Resource : A Comprehensive Overview of Coal. – London : WCA, 2023. – 95 p.

13 BP plc. Statistical Review of World Energy 2024. – London : BP plc, 2024. – 72 p.

14 **Gao J., Wang K., Liu K., Tong Y., Liu J., Zhang Y., Tao Y.** Effect of Coal Preparation on Atmospheric Emissions of Trace Elements and Their Cross-Media Environmental Risk from Chinese Coal-Fired Industrial Boilers // Air Quality, Atmosphere & Health. – 2023. – Vol. 16, № 5. – P. 985 – 995. – https://doi.org/10.1007/s11869-023-01318-z.

15 **Zhou K., Sun Y., Zhang H., et al.** Effects of Moisture on the Ignition and Combustion Characteristics of Lignite Particles : Modeling and Experimental Study // ACS Omega. – 2022.– Vol. 7, № 38. – P. 33683–33694. – https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03462.

16 **Qin D., Chen Q., Li J., Liu Z.** Effects of Pressure and Coal Rank on the Oxy-Fuel Combustion of Pulverized Coal // Energies. – 2022. – Vol. 15, № 1. –Art. 265. – https://doi.org/10.3390/en15010265.

REFERENCES

1 **Butakov, E. A.** Toplivo, processy` goreniya i kotel`ny`e ustanovki [Fuel, Combustion Processes, and Boiler Installations]. – Moscow : Energoatomizdat, 2018. – 384 p.

2 **Lipov, Yu. M., Samoylenko, V. I.** Kotel`ny`e ustanovki i parogeneratory` [Boiler Plants and Steam Generators]. – Moscow : Vysshaya Shkola, 2019. – 512 p.

3 **Semenov, V. G.** Teplotexnicheskie osnovy` szhiganiya tverdogo topliva [Thermal Engineering Fundamentals of Solid Fuel Combustion]. – Saint Petersburg: Energiya, 2020. – 286 p.

4 **Grigoriev, A. V.** Podgotovka uglya k e`nergeticheskomu ispol`zovaniyu [Coal Preparation for Energy Utilization]. – Moscow : Nedra, 2018. – 301 p.

5 **Ravich, M. B.** E`ffektivnost` ispol`zovaniya topliva na teplovy`x e`lektrostanciyax [Fuel Utilization Efficiency at Thermal Power Plants]. – Moscow : Energoizdat, 2019. – 342 p.

6 **Kutateladze, S. S.** Osnovy` teorii teploobmena [Fundamentals of Heat Transfer Theory]. – Moscow : Atomizdat, 2017. – 416 p.

7 **Sazhin, B. S., Bulekov, A. P.** Processy` sushki dispersny`x materialov [Drying Processes of Dispersed Materials]. – Moscow : Khimiya, 2020. – 280 p.

8 **Dmitriev, A. N., Romanenko, V. A.** Sovremenny`e texnologii podgotovki ugol`nogo topliva [Modern Technologies of Coal Fuel Preparation] // Thermal Engineering. 2021;(4):25-32.

9 **Kovalev, V. I., Zhukov, P. A.** Vliyanie granulometricheskogo sostava uglya na e`ffektivnost` ego szhiganiya [Influence of Coal Particle Size Distribution on Combustion Efficiency] // Energy Bulletin. –2022. – № 2. – C. 48 – 55.

10 **Akhmetov, B. S., Suleimenov, M. T.** E`nergeticheskie resursy` Kazaxstana i perspektivy` ix ispol`zovaniya [Energy Resources of Kazakhstan and Prospects for Their Utilization]. – Almaty : Kazakh University Publishing House, 2021. – 268 p.

11 International Energy Agency. Coal 2024 : Analysis and Forecast to 2027. – Paris : IEA, 2024. – 186 p.

12 World Coal Association. The Coal Resource : A Comprehensive Overview of Coal. – London : WCA, 2023. – 95 p.

13 BP plc. Statistical Review of World Energy 2024. – London : BP plc, 2024. – 72 p.

14 **Gao J., Wang K., Liu K., Tong Y., Liu J., Zhang Y., Tao Y.** Effect of Coal Preparation on Atmospheric Emissions of Trace Elements and Their Cross-Media Environmental Risk from Chinese Coal-Fired Industrial Boilers // Air Quality, Atmosphere & Health. – 2023. – Vol. 16, № 5. – P. 985 – 995. – https://doi.org/10.1007/s11869-023-01318-z.

15 **Zhou K., Sun Y., Zhang H., et al.** Effects of Moisture on the Ignition and Combustion Characteristics of Lignite Particles: Modeling and Experimental Study // ACS Omega. – 2022.– Vol. 7, № 38. – P. 33683–33694. – https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03462.

16 **Qin D., Chen Q., Li J., Liu Z.** Effects of Pressure and Coal Rank on the Oxy-Fuel Combustion of Pulverized Coal // Energies. – 2022. – Vol. 15, № 1. –Art. 265. – https://doi.org/10.3390/en15010265.

Received 09.07.26.
Received in revised form 21.08.26.
Accepted for publication 02.09.26.

Г. Т. Мерзадинова[1], А. К. Копышева[2]
[1,2]Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.
09.07.26 ж. баспаға түсті.
21.08.26 ж. түзетулерімен түсті.
02.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҰСАҚТАУ ҚОНДЫРҒЫЛАРЫН ЖАҢҒЫРТУ АРҚЫЛЫ КӨМІРДІ ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАДА ЖАҒУДЫҢ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

Бұл мақалада жылу электр станциялары мен өнеркәсіптік энергетикалық нысандарда қолданылатын ұсақтау қондырғыларын жаңғырту арқылы көмірді жоғары температурада жағу тиімділігін арттыру тәсілдері қарастырылады. Зерттеу көмір отынын дайындау сапасының жану процесінің тұрақтылығына, жылу алмасу қарқындылығына, қазандық қондырғыларының пайдалы әсер коэффициентіне, отын шығынына және экологиялық

көрсеткіштеріне әсерін бағалауға бағытталған. Ерекше назар ұсақтау жабдықтарының құрылымы мен пайдалану параметрлерін оңтайландыруға аударылған. Бұл отынның біркелкі түйіршік құрамын қамтамасыз етуге, ұсақтау процесіндегі меншікті энергия шығынын төмендетуге және отын дайындау жүйесінің жалпы өнімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Дәстүрлі және жаңғыртылған ұсақтау жүйелерін салыстырмалы талдау отынның майдалығын арттыру оның толық жануына, жылулық тиімділіктің жоғарылауына, жанбай қалған көміртек шығындарының азаюына, сондай-ақ қатты бөлшектердің, көміртек тотығының, азот оксидтерінің және басқа да ластаушы заттардың шығарындыларының төмендеуіне ықпал ететінін көрсетті. Сонымен қатар, ұсақтау қондырғыларын жаңғырту механикалық тозуды азайту және жану процесін тұрақтандыру арқылы энергетикалық жабдықтардың пайдалану сенімділігі мен қызмет ету мерзімін арттырады. Алынған нәтижелер заманауи ұсақтау технологияларын енгізу қазіргі өндірістік пайдалану жағдайында көмірмен жұмыс істейтін жылу энергетикалық жүйелерінің энергетикалық тиімділігін, экологиялық тұрақтылығын және экономикалық тиімділігін арттырудың тиімді бағыты екенін дәлелдейді.

Кілтті сөздер: көмірді жоғары температурада жағу, ұсақтау қондырғысы, жабдықтарды жаңғырту, көмірді ұсақтау, отынды дайындау, энергетикалық тиімділік, шығарындыларды азайту, энергия үнемдеу.

Г. Т. Мерзадинова[1], А. К. Копышева[2]
[1,2]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана.
Поступило в редакцию 09.07.26.
Поступило с исправлениями 21.08.26.
Принято в печать 02.09.26.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СЖИГАНИЯ УГЛЯ ПОСРЕДСТВОМ МОДЕРНИЗАЦИИ ДРОБИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В статье рассматриваются методы повышения эффективности высокотемпературного сжигания угля посредством модернизации

дробильных установок, применяемых на тепловых электростанциях и промышленных энергетических объектах. Исследование посвящено оценке влияния качества подготовки угольного топлива на стабильность процесса горения, интенсивность теплообмена, коэффициент полезного действия котельного оборудования, расход топлива и экологические показатели. Особое внимание уделено оптимизации конструкции и эксплуатационных параметров дробильных установок, обеспечивающих получение однородного гранулометрического состава топлива, снижение удельных энергозатрат на процесс дробления и повышение общей производительности системы подготовки топлива. Сравнительный анализ традиционных и модернизированных дробильных систем показал, что улучшение тонкости помола способствует более полному сгоранию топлива, повышению тепловой эффективности, снижению потерь несгоревшего углерода, а также уменьшению выбросов твердых частиц, оксида углерода, оксидов азота и других загрязняющих веществ. Кроме того, модернизация дробильных установок повышает эксплуатационную надежность и срок службы энергетического оборудования за счет снижения механического износа и стабилизации процессов горения. Полученные результаты подтверждают, что внедрение современных технологий дробления является эффективным направлением повышения энергетической эффективности, экологической устойчивости и экономической результативности угольных теплоэнергетических систем в современных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: высокотемпературное сжигание угля, дробильная установка, модернизация оборудования, дробление угля, подготовка топлива, энергетическая эффективность, снижение выбросов, энергосбережение.

ҒТАМР 44.01.09

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/421-441

Р. М. Мустафина[1], Ә. Б. Сағындық[2], А. А. Бектасова[3], *А. Б. Ергалиев[4], А. Д. Тастенов[5]

[1,2,3,4,5]Торайғыров университеті,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8739-7377
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0376-2150
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8888-8894
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-1315-2615
[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1101-5328
*e-mail: yergaliyev10@gmail.com

ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНЕ 65 ЖЫЛ. ЭНЕРГЕТИКА ФАКУЛЬТЕТІНДЕГІ ОҚУ-ӘДІСТЕМЕЛІК ЖҰМЫС. ҮРДІСТЕР МЕН ИННОВАЦИЯЛАР

Мақалада Павлодар индустриалдық институтының (ПИИ) қызметі басталған күннен (1960 жылғы 1 желтоқсан) энергетика факультетіндегі оқу-әдістемелік жұмыстың даму үдерісіне талдау жасалған. ПИИ Павлодар Ертіс өңірінің қарқынды дамып келе жатқан өнеркәсіп-энергетикалық және аграрлық секторларын инженер кадрлармен қамтамасыз ету мақсатында ашылды. Өңір экономикасының осындай жедел дамуына 1954 жылы тың және тыңайған жерлерді игерудің басталуы серпін берді.

Өткен ғасырдың 60-жылдарында өңірдегі кейбір кәсіпорындардың бейінінің өзгеруіне байланысты ПИИ мамандықтарының тізбесі тұрақсыз сипатта болды. Бұл жағдай оқу үдерісін жедел түрде қайта құруды талап етті (зертханалар мен мамандандырылған кабинеттерді жаңаша жабдықтау, кітапхана қорын толықтыру және т.б.), соның ішінде оқу-әдістемелік жұмысты да жетілдіру қажеттігін туындатты.

Оқу-тәрбие үдерісінің сол кезеңдегі талаптарына сәйкес оқу-әдістемелік жұмыстың дамуына 1970-жылдардың басында факультетте тәжірибелі оқытушылар қатарынан әдістемелік комиссияның құрылуы ықпал етті. Комиссияның негізгі міндеті – сол уақыттағы кітапханадағы оқулықтар мен оқу

құралдарының тапшылығы жағдайында оқу үдерісін оқу-әдістемелік материалдармен қамтамасыз ету болды. Сонымен қатар, комиссия жас оқытушыларға әдістемелік көмек көрсету қызметін де атқарды.

90-жылдардың соңында құрылған институттың ғылыми-әдістемелік кеңесінің ең маңызды жетістіктерінің бірі – 2000-жылдардың басында оқу үдерісін ұйымдастыру және оны оқу-әдістемелік тұрғыдан қамтамасыз ету бойынша нормативтік-әдістемелік құжаттар топтамасының қалыптастырылуы болып табылады. Атап айтқанда, «Мамандықтар мен пәндердің оқу-әдістемелік кешендерін қалыптастыру туралы ереже» (ОӘМК және ОӘПК) әзірленіп, қазіргі уақытқа дейін қолданыста. ОӘМК пен ОӘПК-нің жетілдіру жоғары білім және ғылым министрлігінің жаңа нормативтік құжаттарына сәйкес жүйелі түрде жүргізіліп отырады.

Факультеттің профессор-оқытушылар құрамы электрондық оқулықтар мен оқу құралдарын әзірлеу және басып шығару бағытында жоспарлы жұмыс жүргізуде.

Қазіргі кезеңде факультеттің оқу-әдістемелік жұмысы оқытудың модульдік нысанын тиімді пайдалануға бағытталған. Модульдік бағдарламалар Қазақстан Республикасының жоғары оқу орындарында кредиттік оқыту технологиясы аясында бірыңғай тәсілді қамтамасыз ету мақсатында қолданылады, олар Мемлекеттік жалпыға міндетті білім беру стандартының (МЖМБС) негізінде әзірленеді. Модульдік білім беру бағдарламалары мамандарды даярлаудың құзыреттілік моделіне сәйкес жасалып, халықаралық білім беру кеңістігінің талаптарына толық сай келеді.

Кілтті сөздер: оқу-әдістемелік жұмыс, модельдеу, қос тарапты оқыту, модульдік бағдарлама, жұмысқа орналастыру.

Кіріспе

Университеттегі оқыту жұмысы – бұл тек қалыптасқан дәстүрлермен (оқу үдерісі, заманауи материалдық-техникалық және кітапханалық қамтамасыз ету, емтихан сессиялары, тәрбие жұмысы, студенттер қатарына қабылдау рәсімі, түлектерді қорытынды мемлекеттік аттестаттау) шектелмейтін, сонымен қатар инновациялық білім беру технологияларын, дербес ғылыми-зерттеу қызметін, практиканы, студенттік өзін-өзі басқаруды және кәсіби құзыреттерді қалыптастыруды қамтитын динамикалық үдеріс болып табылады. Бұл ретте кәсіби тұрғыдан ұйымдастырылған оқу-әдістемелік жұмыс (ОӘЖ) – оқу үдерісін жетілдіру мен қамтамасыз ету мақсатында нормативтік құжаттар мен оқу-әдістемелік әдебиеттерді

әзірлеуге бағытталған оқытушылар мен кафедралардың жоспарлы қызметі ретінде осы үдерістің негізгі құрамдас бөлігі болып табылады. ОӘЖ тек жұмыс бағдарламаларын (силлабустарды), оқу құралдарын әзірлеуді және студенттердің білімін бақылауды ғана қамтып қоймайды, ең бастысы – жаңа білім беру технологиялары мен оқыту әдістерін енгізуге бағытталады. Бұл қазіргі кезеңде адам қызметінің барлық салаларында жасанды интеллектіні (ЖИ) қолдану жағдайында ерекше өзектілікке ие. Осыған байланысты еңбек нарығында сұранысқа ие және оның талаптарына жауап беретін мамандарды даярлау үдерісін ғылыми-әдістемелік тұрғыдан қамтамасыз ету мәселелері өзекті бола түсуде.

Материалдар мен әдістері

Мақала Павлодар индустриалдық институтының құрылу, қалыптасу және даму тарихына қатысты бұрын жарияланған кітаптар мен ғылыми мақалалар материалдары негізінде, соның ішінде оқу-әдістемелік жұмыс (ОӘЖ) пен оқу үдерісі мәселелерін қамти отырып жазылған; сондай-ақ мақалада Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің нормативтік құжаттары мен Павлодар индустриалдық институтының (С. Торайғыров атындағы Павлодар мемлекеттік университеті / Торайғыров университеті) жылдық есептері пайдаланылған.

Институттың қалыптасуының бастапқы кезеңінде, өткен ғасырдың 60-жылдарында, тек оқу алаңдарының жеткіліксіздігі, зертханалар мен мамандандырылған кабинеттердің жабдықталуы, кітапхана қоры ғана емес, сонымен қатар өңір кәсіпорындарының бейінінің өзгеруіне байланысты мамандықтар тізбесі де тұрақсыз болды. Бұл жағдай ПИИ қызметіне әсер етті, себебі институттың негізгі мақсаты облыстың дамып келе жатқан агро-өнеркәсіптік секторлары үшін инженерлік кадрлар даярлау болатын. Энергетика факультетінің (ЭФ) қалыптасуының алғашқы жылдарында мамандықтар номенклатурасынан «Тоңазытқыш және істерді автоматтандыру» мамандықтары алынып тасталды [1, 14-б.].

Қысқа уақыт ішінде факультет мамандықтары тізбесінің өзгеруі оқу-әдістемелік үдерісті күрделендірді: оқу-әдістемелік әдебиеттерді жедел жаңарту, зертханалар мен кабинеттердің материалдық-техникалық базасын жетілдіру, сондай-ақ жаңа ғылыми-педагогикалық кадрларды тарту қажеттілігі туындады. Энергетика факультетінің ұжымы бұл қиындықтарды профессор-оқытушылар құрамының жүйелі ұйымдастырылған оқу-әдістемелік жұмысының арқасында еңсере алды.

Оқу-тәрбие үдерісінің сол кезеңдегі талаптарына сәйкес оқу-әдістемелік жұмыстың дамуына 1970-жылдардың басында факультетте тәжірибелі оқытушылар қатарынан әдістемелік комиссияның құрылуы ықпал етті.

Комиссияның негізгі міндеті – сол уақыттағы кітапханадағы оқулықтар мен оқу құралдарының тапшылығы жағдайында оқу үдерісін оқу-әдістемелік материалдармен қамтамасыз ету болды; сонымен қатар комиссия жас оқытушыларға әдістемелік көмек көрсету қызметін де атқарды [1, 16-б.].

Институттың қызметінің алғашқы онжылдығының соңында, сол кезең үшін ең заманауи болып саналатын бағдарламаланған оқыту мен білімді бақылау жүйелері инженерлік даярлықтың келесі іргелі пәндері бойынша енгізіле бастады: физика, жоғары математика, химия, электротехниканың теориялық негіздері және т.б. («Физика» және «Жоғары математика» кафедралары энергетика факультетінің құрамында болды).

Қазақстан Республикасының жоғары кәсіби білім берудің мемлекеттік жалпыға міндетті стандарты (МЖМБС, 2000 жыл, тамыз айы) жоғары оқу орнындағы оқу үдерісін ұйымдастыру білім алушылардың міндетті даярлық деңгейіне қол жеткізуін қамтамасыз етуі және материалды терең меңгеруге, шығармашылық тұлғаны және оның іскерлік қасиеттерін дамытуға қажетті жағдайлар жасауы тиіс екендігін атап көрсетеді [2]. Университетте 1999 жылы құрылған ғылыми-әдістемелік кеңес (ҒӘК) аталған МЖМБС-да қойылған міндеттерді жүзеге асыру барысында оқу үдерісін ұйымдастыру және оны оқу-әдістемелік қамтамасыз ету бойынша құжаттар топтамасын қалыптастыруда маңызды рөл атқарды [3].

«С. Торайғыров атындағы Павлодар мемлекеттік университетінің оқу-әдістемелік жұмысы» атты мақалада авторлар университеттің негізінен өңір қажеттіліктері үшін мамандар даярлайтынын атап өтеді. Осыған байланысты мамандықтардың мемлекеттік жалпыға міндетті білім беру стандарттарында көзделген пәндер блоктары бойынша 30 %-дық жоғары оқу орны компоненті, ПМУ Ғылыми кеңесінің шешімімен, жұмыс оқу жоспарларына жұмыс берушілер талаптарын ескеретін пәндер мен арнайы курстарды енгізу арқылы іске асырылады. Сонымен қатар жыл сайын оқу үдерісіне негізінен жаңа, «өсіп келе жатқан» мамандықтар бойынша жаңа оқу пәндері енгізіліп отырды. Сондай-ақ ҚР БҒМ-нің директивалық хаттарына сәйкес кафедралар тарапынан пәндердің оқу-әдістемелік қамтамасыз етілуін уақтылы ұйымдастыру талап етілді [3].

Ғылыми-әдістемелік кеңестің (ҒӘК) ең маңызды жетістіктерінің бірі – 2000-жылдардың басында оқу үдерісін ұйымдастыру және оқу-әдістемелік қамтамасыз ету бойынша нормативтік-әдістемелік құжаттар топтамасының, атап айтқанда «Мамандықтар мен пәндердің оқу-әдістемелік кешендерін қалыптастыру туралы ереженің» (ОӘМК және ОӘПК) құрастырылуы болып табылады. ОӘМК мен ОӘПК-нің негізгі мақсаты – кафедралар арқылы әрбір студенттің таңдаған мамандығы бойынша МЖМБС-да белгіленген даярлық

деңгейіне қол жеткізуін қамтамасыз ету және оқытуды дараландыру мен саралау негізінде мамандар даярлау сапасын арттыру. Қазіргі уақытта да оқу үдерісін ұйымдастыруда ОӘМК пен ОӘПК қолданылады, ал оларды жетілдіру жоғары білім және ғылым министрлігінің жаңа нормативтік құжаттарына, еңбек нарығы мен жұмыс берушілер талаптарына сәйкес жүйелі түрде жүргізіледі.

Оқытуды одан әрі дараландыру мақсатында курстық және дипломдық жобалар мен жұмыстардың тақырыптары жұмыс берушілер талаптарын ескере отырып таңдалады, сонымен қатар кафедралар мен студенттердің ғылыми-зерттеу жұмыстарының тақырыптары да өндірістік мәселелерге бағытталған. Бұл дәстүр ПИИ-тің қалыптасуының алғашқы жылдарында негізделіп, жоғары оқу орнының 65 жылдық қызметі барысында жалғасып келеді.

Осы талаптарды ескере отырып, пәндердің силлабустары әзірленеді, олардың басты мақсаты – студентті ғылыми әдебиеттермен жұмыс істеуге үйрету, мамандық бойынша проблемалық мәселелер мен тапсырмаларды өз бетінше шешу дағдыларын қалыптастыру.

XXI ғасырдың басында университетте «ПМУ оқу үдерісінде есептеу техникасын пайдалану» атты мақсатты кешенді бағдарлама қабылданды, оның негізгі міндеті, ең алдымен, инженерлік-техникалық бағыттағы мамандар даярлаудың қарқындылығы мен тиімділігін арттыру болды.

Уақыт көрсеткендей, оқу үдерісін ақпараттық және компьютерлік технологиялар бойынша құру, болашақ энергетиктердің нақты мамандық міндеттерін шешуде қажетті жалпы базалық теориялық және практикалық білімдер мен бағдарламалық құралдарды меңгеретіндей етіп ұйымдастыру туралы шешім дұрыс әрі негізделген қадам болды. ҒӘК бұл шешімге бағдарламалық өнімдер мен техникалық құралдардың жоғары қарқынмен үнемі жетілдіріліп, жаңарып отыратынын ескере отырып келді.

Зертханалық және практикалық сабақтарды, сондай-ақ студенттердің ғылыми-зерттеу жұмыстарын дербес компьютерлерде модельдеу өз тиімділігін дәлелдеді, себебі бұл тәсіл икемділігімен, зерттеу тақырыптарының ауқымы мен көлемінің кеңеюімен ерекшеленеді. Энергетика саласының қазіргі даму кезеңінде туындайтын мәселелер ақпараттық-коммуникациялық технологиялардың үздіксіз дамуы нәтижесінде шешілуі мүмкін, бұл өз кезегінде зияткерлік энергетикалық жүйелер саласында мамандар даярлаудың білім беру үдерісіне белгілі бір талаптар қояды. Энергетикалық үдерістерді модельдеу және оларды зертханалық тұрғыдан зерттеу – қазіргі заманғы энергетика мамандарын даярлаудың маңызды бағыттарының бірі болып табылады [4].

Маманның қалыптасу үдерісінде студенттердің өндірістік және оқу практикалары ерекше маңызға ие, олардың ұйымдастырылуы мен нәтижелілігіне университетте үлкен көңіл бөлінеді. Кәсіби практика туралы ереже, өтпелі практикалардың силлабустары мамандардың кәсіби даярлығының сапасын арттыруға бағытталған.

Торайғыров университетінің Мансап орталығының практика базалары жөніндегі электрондық анықтамалығына сәйкес энергетика факультеті 84 кәсіпорынмен практикадан өту туралы шарт жасасқан (жылуэнергетика кафедрасы бойынша – 26 шарт, электртехника және автоматтандыру кафедрасы бойынша – 29 шарт, электр энергетикасы кафедрасы бойынша – 29 шарт). Олардың қатарында «Ақсу ферроқорытпа зауыты», «Қазақстан алюминийі» АҚ, «Еуразиялық энергетикалық корпорация» АҚ, «Павлодарэнерго» АҚ, «Қазақстан электролиз зауыты» АҚ, «Павлодар мұнай-химия зауыты» ЖШС, «Кастинг» ЖШС, «KSP Steel» ЖШС, «Павлодар аймақтық электр желілік компаниясы» АҚ, «Қазэнергокабель» АҚ, «Б. Нұржанов атындағы Екібастұз ГРЭС-1» ЖШС, «Д. Д. Махмудов атындағы Павлодар қаласының трамвай басқармасы» АҚ және басқа да кәсіпорындар бар [5].

Өңір өнеркәсібінің жетекші кәсіпорындарымен көпжылдық нәтижелі әріптестік қатынастардың тиімділігі факультет түлектерінің осы кәсіпорындарға жұмысқа орналасуымен дәлелденеді.

Еңбек нарығында сұранысқа ие және өндірістің өзгермелі жағдайларына қысқа мерзімде бейімделе алатын мамандар даярлау, студенттердің практикалық дағдыларын дамыту бағытында кәсіби даярлықты едәуір жақсартуды талап етеді.

Екінші курс студенттері үшін көлемі 15 кредитті құрайтын микробіліктілік бағдарламалары іске асырылады, оқу қорытындысы бойынша тиісті біліктіліктер беріледі. Біліктілік емтихандарын серіктес, қаланың энергетика саласындағы кәсіпорындардың өкілдері кіретін комиссия қабылдайды (1-кесте).

1-кесте – Факультеттің екінші курс студенттеріне арналған микробіліктілік бағдарламалары

Білім беру бағдарламасының шифры	Білім беру бағдарламасының атауы	Микробіліктілік атауы
6В07106	Электрэнергетика	Электр жабдықтарын жөндеуші
6В07131	Энергия менеджменті және тұрақты даму	Энергетикалық аудитор

6В07101	Автоматтандыру және басқару	БӨАжА жөндеушісі (бақылау-өлшеу аспаптары және автоматика жөндеушісі)
6В06201	Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар	
6В07141	Автоматтандыру және өнеркәсіптік робототехника	
6В07111	Жылуэнергетика	Қазандық / турбиналық жабдықтардың операторы
6В07177	Жылуэнергетика және тұрақты даму	

Қос тарапты оқыту нысаны – аталған өзекті мәселені шешудің іс жүзіндегі ең тиімді жолдарының бірі. Бұл оқу үдерісін ұйымдастыру нысаны теориялық оқытуды және практикалық дағдыларды қалыптастыруды үйлестіретін қолайлы синтез болып табылады. Айта кету керек, ПИИ қызметінің алғашқы жылдарында дәл осы қос тарапты оқыту нысаны басымдыққа ие болды: алғашқы студенттердің басым бөлігі жұмысшы табының өкілдері мен Кеңес Армиясы қатарынан демобилизацияланған азаматтар болды, олар Павлодар кәсіпорындарындағы еңбек қызметін институттағы оқумен табысты ұштастыра білді.

Қос тарапты оқыту нысанын қолдану оқу үдерісін сапалы, жаңа деңгейдегі оқу-әдістемелік қамтамасыз етуді талап етеді, өйткені энергетикалық мамандықтар бойынша МЖМБС талаптарына сәйкес мамандар даярлаудың сапасы мен міндетті даярлық деңгейі қамтамасыз етілуі тиіс. Көптеген жылдар бойы факультетте қос тарапты оқыту технологиясы колледж түлектері үшін (колледжде меңгерілген пәндерді ескере отырып, қысқартылған білім беру бағдарламалары бойынша) және екінші жоғары білім беру бағдарламалары бойынша білім алушылар үшін оқу үдерісін ұйымдастыру барысында табысты жүзеге асырылып келеді.

XXI ғасырдың басында компьютерлік технологиялар мен интернеттің адам қызметінің барлық салаларына кеңінен енуіне байланысты ҚР БҒМ кітапхана қорының кемінде 20 %-ын электрондық оқу-ғылыми материалдар құрауы тиіс деген көрсеткіш белгіледі [6].

Университеттің ғылыми кітапханасы (ҒК) 2001 жылдан бастап жалпы білім беретін пәндер бойынша электрондық оқулықтардың жекелеген даналарын, ал 2002 жылдан бастап – арнайы пәндер бойынша электрондық оқулықтарды сатып ала бастады. Заманауи сканердің сатып алынуынан кейін ҒК қызметкерлері сирек басылымдарды сканерлеу және оларды

цифрландыру бойынша жүйелі жұмыс жүргізіп, оқу және ғылыми үдерістерді электрондық сипаттағы жаңа басылымдармен қамтамасыз етті. Бұл мәселені шешуде 2000-жылдардың басында ғылыми журналдарға қосымша материалдар да елеулі көмек көрсетті. ПМУ Ғылыми кеңесінің шешімімен университет баспасынан жарық көретін профессор-оқытушылар құрамының монографиялары, оқулықтары, оқу және оқу-әдістемелік құралдарының электрондық нұсқаларын міндетті түрде университеттің ғылыми кітапханасына тапсыру туралы бұйрық шығарылды. ПМУ басшылығы жыл сайын Қазақстан, Ресей және ТМД елдерінің жоғары оқу орындарының электрондық басылымдарына жазылым рәсімдеді. Кейбір электрондық басылымдар интернеттен жүктелді.

Осы кезеңде факультет оқытушылары университетте ақпараттық технологияларды енгізуге арналған құрылымдық бөлімшенің (IT-HUB) ашылуына байланысты электрондық оқулықтар мен оқу-әдістемелік құралдарды әзірлеуге және жариялауға кірісті. Профессор-оқытушылар құрамы, кітапханашылар және IT-HUB қызметкерлерінің бірлескен күш-жігерінің нәтижесінде оқу үдерісін электрондық оқулықтармен және оқу құралдарымен қамтамасыз ету деңгейі жоғары дәрежеге жетті.

Пандемия кезеңінде (2020 жылғы ақпаннан 2022 жылдың бірінші жартысына дейін), оқу үдерісі онлайн форматта жүргізілген уақытта, электрондық оқу-әдістемелік материалдардың болуы оқу үдерісін ұйымдастыру мен өткізуді едәуір жеңілдетті. Электрондық оқу басылымдары күндізгі және қашықтықтан оқыту нысандарына арналған, сондай-ақ біліктілікті арттырудың корпоративтік курстарында пайдаланылуы мүмкін. Олар білім алушылардың мамандық бойынша түпнұсқалық іргелі әдебиеттерді өз бетінше меңгеру құзыреттерін қалыптастыруға және игерілген теориялық білім негізінде типтік міндеттерді шешу қабілеттерін дамытуға ықпал етеді. Сонымен қатар, электрондық оқулықтар мен оқу құралдары білім алушыларда қажетті ақпаратты зерттелетін тақырып аясында жедел табу дағдыларын қалыптастырады. Бұл ресурстарды энергетика саласының қызметкерлері мен кәсіпорындардың мамандары, олардың басым бөлігі энергетика факультетінің түлектері болып табылатындықтан, өз бетінше біліктілігін арттыру мақсатында да пайдалана алады.

2024 жылғы 31 желтоқсандағы жағдай бойынша факультеттің профессор-оқытушылар құрамына электрондық оқу басылымдарына шамамен 30 авторлық куәлік берілген.

Ғылыми кітапхананың оқу-әдістемелік әдебиеттермен, электрондық және қағаз тасымалдағыштарда жеткілікті әрі тұрақты толықтырылып отыратын қорының болуы, профессор-оқытушылар құрамының «Кереку»

баспасында оқу және оқу-әдістемелік құралдарды қағаз түрінде уақтылы басып шығару қажеттілігін төмендетпейді. Оқытушылар тарапынан мұндай басылымдарды дер кезінде шығару қажеттілігі білім беру бағдарламалары (мамандықтар) бойынша жұмыс-оқу жоспарларының жыл сайын жұмыс берушілер мен еңбек нарығы талаптарына сәйкес жаңартылып отыруымен, атап айтқанда факультет түлектерінде жаңа, сұранысқа ие құзыреттерді қалыптастыру талаптарымен байланысты.

2010 жылы Торайғыров университетінің әлемдік білім беру кеңістігіне қосылуы білім алушыларға, оқытушыларға және факультет қызметкерлеріне халықаралық білім беру қорларының қаражаты есебінен халықаралық академиялық ұтқырлық бағдарламаларына қатысуға мүмкіндік берді [7, 191-б.], сондай-ақ ҚР Президентінің «Болашақ» халықаралық білім беру стипендиясы аясында да жүзеге асырылды. «Болашақ» бағдарламасы шетелдік жоғары оқу орындарында білім алғаннан кейін ғылыми дәреже алумен қатар, әлемнің жетекші компаниялары мен университеттерінде ғылыми және өндірістік тағылымдамадан өтуді де қарастырады.

Халықаралық академиялық ұтқырлыққа қатысу халықаралық ғылыми байланыстар тілі болып табылатын ағылшын тілін меңгеруді талап етеді. Осыған байланысты университетте бірнеше жыл бойы оқу үдерісі қазақ, орыс және ағылшын тілдерінде жүргізіліп келеді. Үш тілде сапалы оқу үдерісін қамтамасыз ету мақсатында факультет оқытушылары тек оқу әдебиеттерін ғана емес, сонымен қатар қазақ, орыс және ағылшын тілдерінде монографиялар да жариялайды.

2013 жылы университеттің «Кереку» баспасынан Томск политехникалық университетінің ғалымдарымен бірлесіп «Renewable Energy» атты оқу құралы жарық көрді. Авторлар ұжымы – Б. В. Лукутин, М. А. Сурков, Р. М. Мустафина, Е. Ж. Сарсикеев – буындар сабақтастығы мен тәжірибе алмасудың ғана емес, сонымен қатар нәтижелі халықаралық ынтымақтастықтың айқын үлгісі болып табылады. Борис Владимирович Лукутин – техника ғылымдарының докторы, Томск политехникалық университетінің профессоры, М. А. Сурков пен ПМУ түлегі Е. Ж. Сарсикеевтің ғылыми жетекшісі [8].

Соңғы алты жыл ішінде университет баспасынан жарық көрген оқу құралдарының авторлық ұжымдарын талдау факультет кафедраларында қалыптасқан оң дәстүрді көрсетеді: тәжірибелі оқытушылар жас әріптестерін оқу және оқу-әдістемелік құралдарды әзірлеуге тарта отырып, олардың тек оқу құралдарын жазу дағдыларын ғана емес, сонымен қатар оқу-әдістемелік жұмысты жүргізу қабілеттерін қалыптастыруға ықпал етеді. Бұл өз кезегінде жас оқытушылардың кәсіби деңгейі мен әдістемелік сауаттылығын арттыруға мүмкіндік береді.

2-кестеде факультет профессор-оқытушылар құрамының жарияланымдық белсенділігі көрсетілген. Кестеде мемлекеттік және ағылшын тілдерінде жарық көрген оқу құралдары мен монографиялар туралы мәліметтер берілген [9].

Алдыңғы кестеде келтірілген оқу құралдары мен монографиялар туралы мәліметтер кафедралар бөлінісінде 3-кестеде ұсынылған [9].

2-кесте – 2018-2024 жылдар аралығындағы оқу-әдістемелік құралдар мен монографиялар саны (факультет бойынша)

Оқу жылы	Жалпы жарияланған	Оқу-әдістемелік құралдар			Монографиялар		
		Барлығы	*ОТ	**ҚТ/АТ	Барлығы	*ОТ	**ҚТ/АТ
2018-2019	20	17	10	7	3	2	1/-
2019-2020	15	14	11	3	1	1	-
2020-2021	15	11	5	5/1	4	4	-
2021-2022	14	10	5	5/-	4	3	1/-
2022-2023	10	7	4	2/1	3	3	-
2023-2024	12	7	4	3/-	5	2	1/2

*ОТ – орыс тіліндегі басылым;
**ҚТ/АТ – қазақ/ағылшын тілдеріндегі басылым.

Соңғы алты оқу жылында ағылшын тілінде авторлары Р. М. Мустафина, А. К. Каирбаева, О. М. Талипов, Г. О. Мусекенова «Task book on the theory of linear electric circuits. Study Guide» атты оқу әдістемелік құралы және авторлары А.Ж. Саринова, А.В. Дробинский, Е.Ж. Сарсикеев «Linear electric circuits. Direct and single-phase sinusoidal currents» атты оқу әдістемелік құралы басылып шықты (Электротехника және автоматтандыру кафедрасы).

2024 жылы жарияланған ағылшын тіліндегі екі монографияның авторлары Электротехника және автоматтандыру кафедрасының қауымдастырылған профессоры О.А. Андреева («Development of diagnosis methods of rotor faults in induction motors») және жылу-энергетика кафедрасының профессоры А.К. Кинжибекова («Thermal characteristics of briquettes from industrial and plant waste»).

3-кесте – 2018-2024 жылдар аралығындағы оқу-әдістемелік құралдар мен монографиялар саны (жеке кафедралар бойынша)

Оқу жылы	Жалпы жарияланған	Оқу-әдістемелік құралдар			Монографиялар		
		Барлығы	*ОТ	**ҚТ/АТ	Барлығы	*ОТ	**ҚТ/АТ
«Жылуэнергетика» кафедрасы							
2018-2019	9	8	4	4/-	1	1	-
2019-2020	5	4	3	1/-	1	1	-
2020-2021	4	3	2	1/-	1	1	-
2021-2022	5	3	1	2/-	2	1	1/-
2022-2023	4	2	1	1/-	2	2	-
2023-2024	3	2	-	2/-	1	-	-/1
«Электртехника және автоматтандыру» кафедрасы							
2018-2019	7	7	5	2/-	-	-	-
2019-2020	8	8	6	2/-	-	-	-
2020-2021	10	7	2	4/1	3	3	-
2021-2022	7	5	2	3/-	2	2	-
2022-2023	6	5	3	1/1	1	1	-
2023-2024	3	1	1	-	2	-	1/1
«Электрэнергетика» кафедрасы							
2018-2019	4	2	1	1	2	1	1/-
2019-2020	2	2	2	-	-	-	-
2020-2021	1	1	1	-	-	-	-
2021-2022	2	2	2	-	-	-	-
2022-2023	-	-	-	-	-	-	-
2023-2024	6	4	3	1/-	2	2	-

Қазіргі кезеңде факультеттің оқу-әдістемелік жұмысы (ОӘЖ) оқытудың модульдік нысанын тиімді пайдалануға бағытталған [10]. Модульдік бағдарламалар Қазақстан Республикасының жоғары оқу орындарында кредиттік оқыту технологиясы аясында бірыңғай тәсілді қамтамасыз ету мақсатында қолданылады. Олар Мемлекеттік жалпыға міндетті білім беру стандартының (МЖМБС) негізінде әзірленеді.

Модульдік білім беру бағдарламалары мамандарды даярлаудың құзыреттілік моделінің аясында жасалады. Бұл ретте жоғары және жоғары

оқу орнынан кейінгі білім беру барысында қалыптасатын құзыреттер пәндік салаға қатысты және әмбебап (жалпы, пәнаралық) құзыреттер болып бөлінеді.

Қазіргі кезеңде дәстүрлі білім беру мен энергетик мамандарды даярлау энергетикалық жүйелердің күрделенуінің артуымен, соның ішінде жаңартылатын және таратылған энергия көздерін, байланыс, басқару және ақпараттық технологияларды біріктіру қажеттілігімен бетпе-бет келуде [4]. Осыған байланысты модульдік білім беру бағдарламалары жүйелік-бағдарланған дағдыларды дамыту және пәнаралық оқыту қағидаттарына негізделуі тиіс.

Модульдік білім беру бағдарламасы (МББ) – оқу материалы кәсіби құзыреттер төңірегінде біріктірілген дербес блоктарға (модульдерге) бөлінген оқыту жүйесі. Бұл бағдарлама оқу траекториясын икемді түрде қалыптастыруға, теориялық білімді практикалық дағдылармен ұштастыруға және әрбір аяқталған модуль бойынша білімді бақылауды қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Факультетте жоғары және жоғары оқу орнынан кейінгі білім беру бағдарламалары бойынша модульдік білім беру бағдарламалары Ғылым және жоғары білім министрінің 2022 жылғы 20 шілдедегі №2 бұйрығымен бекітілген және 2023 жылғы 20 ақпандағы №66 бұйрығына өзгерістер енгізілген, Жоғары және жоғары оқу орнынан кейінгі білім берудің мемлекеттік жалпыға міндетті білім стандартына сай, сондай-ақ әрбір мамандықтың кәсіби стандартына сәйкес әзірленген. Барлық модульдік білім беру бағдарламалары саланың жетекші кәсіпорындары болып табылатын серіктестермен келісіледі, әзірлеу және келісу кезеңіне білім алушылар да тартылады.

Факультет кафедралары модульдік білім беру бағдарламаларын келесі талаптарды ескере отырып әзірлейді:

– білім беру мақсаттарына байланысты өзгертілуі мүмкін тәуелсіз модульдер жиынтығы;

– нәтижеге бағдарлану: негізгі мақсат – пәндерді жай ғана меңгеру емес, мамандық бойынша қажетті нақты дағдылар мен құзыреттерді қалыптастыру;

– икемділік: білім алушылардың оқу жоспарын белгілі бір деңгейде өз бетінше қалыптастыру мүмкіндігі (Болон үдерісінің қағидаттарына сәйкес);

– аттестаттау: білімді бағалау әр модуль аяқталғаннан кейін жүргізіледі, бұл бақылау іс-шараларын кезең-кезеңімен ұйымдастыруға мүмкіндік береді;

– дербестік: модульдік оқыту студенттердің материалды өздігінен меңгеруін ынталандырады.

Соңғы жылдары факультеттің оқу үдерісіне модульдік білім беру бағдарламаларын енгізу және қолдану мамандарды даярлаудың құзыреттілік моделін тиімді жүзеге асыруға ықпал етті: оқу барысында қалыптасқан кәсіби құзыреттер түлектердің алған мамандығы бойынша жұмысқа орналасуына мүмкіндік береді.

Оқу-әдістемелік жұмыстың тиімділігінің объективті көрсеткіштерінің бірі – факультет қызметіне берілетін сыртқы бағалау. «Атамекен» Ұлттық кәсіпкерлер палатасының 2024 жылғы рейтингі бойынша «Автоматтандыру және басқару» мамандығы конкурсқа қатысқан 27 жоғары оқу орнының ішінде 4-орынды иеленді; «Электр энергетикасы» – 5-орын; «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» мамандығы Қазақстан Республикасының 23 білім беру бағдарламасы арасында 9-орында тұр [11].

ОӘЖ пен жалпы оқу үдерісінің тиімділігінің тағы бір объективті көрсеткіші – факультет түлектерінің жұмысқа орналасуы (4-кесте).

4-кесте – Факультет түлектерінің жұмысқа орналасу көрсеткіші

Жылдар	ҚР бойынша жұмысқа орналасу, **%**	Жұмысқа орналасу ЭФ, %	Жұмыспен қамту, **%**	Мамандық бойынша жұмысқа орналасу ФЭ, %
2021	74	81	10	71
2022	80	85	11	64
2023	81	86	7	67
2024	75	84	7	67
2025	84	88	5	66

Соңғы жылдары факультет түлектерінің жұмысқа орналасу көрсеткіштерінің республика бойынша орташа көрсеткіштерден жоғары болуы кафедралардың модульдік білім беру бағдарламаларын еңбек нарығының нақты талаптарына бейімдеуімен және жұмыс берушілердің оқу үдерісіне белсенді қатысуымен байланысты.

«Атамекен» ҰКП деректеріне сәйкес жұмыс берушілердің білім беру бағдарламаларының сапасына қанағаттану деңгейі артқан: 2022–2024 жылдар аралығында бұл көрсеткіш 24,6 %-ға өсті. Жас мамандарға сұраныс артып келеді, бұл ретте өңірлік жоғары оқу орындары мен мамандандырылған аккредитациядан өткен бағдарламалардың рөлі зор. Жоғары оқу орындары түлектерінің басым бөлігі өз мамандығы бойынша жұмыс істейді (ел бойынша орташа көрсеткіш – 74,5 %) [12]. 4-кесте мәліметтеріне сәйкес энергетика факультеті түлектерінің мамандығы бойынша жұмысқа орналасу

көрсеткіші республикадағы орташа деңгейден төмен, бұл жағдайды бірнеше факторлармен түсіндіруге болады. Өңірлік энергетика еңбек нарығының сұранысы шектеулі (факультет жыл сайын шамамен 300 маман дайындайды), көптеген кәсіпорындарда белгілі бір жұмыс тәжірибесі талап етіледі, сондай-ақ жұмыс берушілер ұсынатын еңбекақы деңгейі жас мамандардың күткен талаптарына әрдайым сәйкес келе бермейді.

Нәтижелер және талқылау

Техникалық, кейіннен көпсалалы жоғары оқу орнының қалыптасуы мен даму жылдарында ведомстволық нормативтік құжаттарға сәйкес, еңбек нарығының энергетика саласы талаптарына жауап беретін білікті инженер-энергетиктерді даярлау мақсатында жоспарлы оқу-әдістемелік жұмыс жүргізілді. Сонымен қатар, оқу-әдістемелік жұмыс үнемі қайта құрылып, жетілдіріліп отырды. ПИИ қалыптасуының алғашқы кезеңдерінде оқу-әдістемелік жұмыс негізінен кітапхана қорының жеткіліксіздігі жағдайында оқу процесін оқу-әдістемелік материалдармен қамтамасыз етуге, сондай-ақ жас оқытушыларға әдістемелік көмек көрсетуге бағытталды.

XXI ғасырдың басында энергетикалық мамандықтар бойынша Мемлекеттік жалпыға міндетті білім беру стандарты талаптарын орындау үшін оқу-әдістемелік мамандықтар кешендері (ОӘМК) мен оқу-әдістемелік пәндер кешендері (ОӘПК) туралы ережелер әзірленді.

Оқыту үдерісін үш тілде (қазақ, орыс, ағылшын) қамтамасыз ету мақсатында факультет оқытушылары осы тілдерде оқу құралдары мен монографиялар жариялайды, сонымен қатар ұрпақтар сабақтастығы дәстүрі сақталады: тәжірибелі оқытушылар жас әріптестерін бірлескен авторлыққа тартады. Сонымен бірге, оқу-әдістемелік жұмыста халықаралық ынтымақтастық тәжірибесі де дамып келеді [13].

Модульдік білім беру бағдарламаларына көшу – оқу-әдістемелік жұмыс дамуының жаңа кезеңі болып табылады, ол Болон үдерісі қағидаттарына сәйкес келетін мамандарды құзыреттілікке негізделген даярлау моделін іске асыруға бағытталған.

Қорытынды

Оқу-әдістемелік жұмыстың тиімділігінің объективті көрсеткіші ретінде факультет қызметінің сыртқы бағалануы қарастырылады. Атамекен Ұлттық кәсіпкерлер палатасы рейтингісінің 2024 жылғы қорытындыларына сәйкес, «Автоматтандыру және басқару» білім беру бағдарламасы конкурсқа қатысқан 27 жоғары оқу орнының ішінде 4-орынды иеленді; «Электроэнергетика» – 5-орын; ал «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» білім беру бағдарламасы Қазақстан Республикасының жоғары оқу орындары арасындағы 23 бағдарлама ішінде 9-орынға орналасты [11].

Оқу-әдістемелік жұмыс пен жалпы оқу үдерісінің тиімділігінің тағы бір объективті көрсеткіші ретінде факультет түлектерінің жұмысқа орналасу деңгейі қарастырылады (4-кесте).

Соңғы жылдары факультет түлектерінің жұмысқа орналасу көрсеткіштерінің республика бойынша орташа көрсеткіштерден тұрақты түрде жоғары болуы кафедралардың профессор-оқытушылар құрамының білім беру бағдарламаларын еңбек нарығының нақты талаптарына бейімдеуімен, сондай-ақ жұмыс берушілерді оқу үдерісіне белсенді түрде тартуымен байланысты.

ПАЙДАЛАНҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова. 1960 – 2005 гг. (история становления и развития): книга. – Павлодар : «ЭКО», 2005. – 276 с.

2 Об утверждении Государственного общеобязательного стандарта образования Республики Казахстан «Образование высшее профессиональное. Основные положения. ГОСО РК 3.001-2000: приказ Министерства образования и науки Республики Казахстан от 25 августа 2000 года, № 857 // [Электронный ресурс]. – https://prg.kz/document/?doc_id=1030445.

3 **Шеломенцева, В. П., Мустафина, Р. М.** Методическая работа в Павлодарском государственном университете // Вестник ПГУ. – 2002. – № 2. – С. 168-175.

4 **Kotsampopoulos, P., Hatziargyriou, N., Strasser, T. I., Moyo, C., Rohjans, S., Steinbrink, C., Palensky, P., van der Meer, A. A., Bondy, D. E. M., Heussen, K., Calin, M., Khavari, A. M., Sosnina, M., Rodriguez, J. E., & Burt, G. M.** Validating Intelligent Power and Energy Systems: A Discussion of Educational Needs // Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems : HoloMAS 2017 / ed. by V. Mařík, W. Wahlster, T. Strasser, P. Kadera. – Cham : Springer, 2017. – Lecture Notes in Computer Science. – Vol. 10444. – P. 200–212. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64635-0_15

5 **Биткеева, А. А.** База практик. Факультет Энергетики. [Электронный ресурс]. – URL: https://tou.edu.kz/ru/ (Дата обращения: 16.02.2025)

6 О формировании библиотечных фондов: приказ Министерства образования и науки Республики Казахстан от 5 июня 2020 года, № 231 // [Электронный ресурс]. – https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2000020827/history.

7 История Павлодарского государственного университета имени С. Торайгырова (2006-2012 гг.) : книга. – Павлодар : «ЭКО», 2013. – 364 с.

8 **Лукутин, Б. В., Сурков, М. А., Мустафина, Р. М., Сарсикеев, Е. Ж.** Renewable Energy. Teaching aid: учебное пособие. – Павлодар : Кереку, 2013. – 148 с.

9 Бюллетень издательства «Кереку», 2019-2024 гг.

10 О внесении изменений и дополнения в приказ Министра образования и науки Республики Казахстан от 20 апреля 2011 года, № 152. Об утверждении Правил организации учебного процесса по кредитной технологии обучения: приказ Министра образования и науки Республики Казахстан от 2 июня 2014 года, № 198. Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 3 июля 2014 года, № 9560 // [Электронный ресурс]. – https://adilet.zan.kz/.

11 Рейтинг образовательных программ НПП «Атамекен» [Электронный ресурс]. – URL: https://atameken-rankings.kz (Дата обращения: 17.02.2025)

12 Central Asia Cronos [Электронный ресурс]. – URL: https://old.cronos.asia/obshhestvo/vypuskniki-kazahstanskih-vuzov-stali-rezhe-trudoustraivatsya (Дата обращения: 18.02.2025)

13 **Julio César Ponce de León Guerra, Mabel del Pilar Espinosa Torres, Miguel Alejandro Riverón Cabrera.** Extra-Class Activities to Support the Energy Education of Students of the Transport Operation Specialty // The Educational Review, USA. – 2021. – Vol. 5, No. 11. – P. 410–417. – http://dx.doi.org/10.26855/er.2021.11.002

REFERENCES

1 Pavlodarskij gosudarstvennyj universitet im. S. Torajgyrova. 1960 – 2005 gg. (istoriya stanovleniya i razvitiya) [Pavlodar State University named after S. Toraigyrov. 1960–2005 (history of formation and development)] [Text]: kniga. – Pavlodar : «EKO», 2005. – 276 p.

2 Ob utverzhdenii Gosudarstvennogo obsheobyazatelnogo standarta obrazovaniya Respubliki Kazahstan «Obrazovanie vysshee professionalnoe. [On approval of the State Compulsory Education Standard of the Republic of Kazakhstan "Higher Professional Education.] [Text] Osnovnye polozheniya. GOSO RK 3.001-2000: prikaz Ministerstva obrazovaniya i nauki Respubliki Kazahstan ot 25 avgusta 2000 goda, № 857 // [Electronic resource]. – https://prg.kz/document/?doc_id=1030445.

3 **Shelomenceva V. P., Mustafina R. M.** Metodicheskaya rabota v Pavlodarskom gosudarstvennom universitete [Methodological work at Pavlodar State University] [Text] // Vestnik PGU. – 2002. – № 2. – P. 168-175.

4 **Kotsampopoulos, P., Hatziargyriou, N., Strasser, T. I., Moyo, C., Rohjans, S., Steinbrink, C., Palensky, P., van der Meer, A. A., Bondy, D. E. M., Heussen, K., Calin, M., Khavari, A. M., Sosnina, M., Rodriguez, J. E., & Burt, G. M.** Validating Intelligent Power and Energy Systems: A Discussion of Educational Needs // Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems: HoloMAS 2017 / ed. by V. Mařík, W. Wahlster, T. Strasser, P. Kadera. – Cham: Springer, 2017. – Lecture Notes in Computer Science. – Vol. 10444. – P. 200–212. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-64635-0_15

5 **Bitkeeva, A. A.** Baza praktik. Fakultet Energetiki. [Internship Center. Faculty of Energy] [Elektronnyj resurs]. – URL: https://tou.edu.kz/ru/ (Data obrasheniya: 16.02.2025)

6 O formirovanii bibliotechnyh fondov: prikaz Ministerstva obrazovaniya i nauki Respubliki Kazahstan ot 5 iyunya 2020 goda, № 231 [On the formation of library collections: order of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan dated June 5, 2020] // [Electronic resource]. – https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2000020827/history.

7 Istoriya Pavlodarskogo gosudastvennogo universiteta imeni S.Torajgyrova (2006-2012 gg.) [History of Pavlodar State University named after S. Toraigyrov (2006-2012)] [Text]: kniga. – Pavlodar : «EKO», 2013. – 364 p.

8 **Lukutin, B. V., Surkov, M. A., Mustafina, R. M., Sarsikeev, E. Zh.** Renewable Energy. Teaching aid [Text]: uchebnoe posobie. – Pavlodar : Kereku, 2013. – 148 p.

9 Byulleten izdatelstva «Kereku», 2019–2024 gg. [Kereku Publishing House Bulletin, 2019–2024] [Text]

10 O vnesenii izmenenij i dopolneniya v prikaz Ministra obrazovaniya i nauki Respubliki Kazahstan ot 20 aprelya 2011 goda, № 152. Ob utverzhdenii Pravil organizacii uchebnogo processa po kreditnoj tehnologii obucheniya: prikaz Ministra obrazovaniya i nauki Respubliki Kazahstan ot 2 iyunya 2014 goda, № 198. [On amendments and additions to the order of the Minister of Education and Science of the Republic of Kazakhstan dated April 20, 2011, No. 152. On approval of the Rules for organizing the educational process using credit technology of education: order of the Minister of Education and Science of the Republic of Kazakhstan dated June 2, 2014, No. 198.] [Text] Zaregistrirovan v Ministerstve yusticii Respubliki Kazahstan 3 iyulya 2014 goda, № 9560 // [Electronic resource]. – https://adilet.zan.kz/.

11 Rejting obrazovatelnyh programm NPP «Atameken» [Atameken National Chamber of Entrepreneurs' Ranking of Educational Programs] [Electronic resource]. – URL: https://atameken-rankings.kz (Data obrasheniya: 17.02.2025)

12 Central Asia Cronos [Electronic resource]. – URL: https://old.cronos.asia/obshhestvo/vypuskniki-kazahstanskih-vuzov-stali-rezhe-trudoustraivatsya (Data obrasheniya: 18.02.2025)

13 **Julio Cesar Ponce de Leon Guerra, Mabel del Pilar Espinosa Torres, Miguel Alejandro Riveron Cabrera.** Extra-Class Activities to Support the Energy Education of Students of the Transport Operation Specialty // The Educational Review, USA. – 2021. – Vol. 5, No. 11. – P. 410–417. – http://dx.doi.org/10.26855/er.2021.11.002

15.04.26 ж. баспаға түсті.
06.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
03.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

Р. М. Мустафина[1], А. Б. Сагындык[2], А. А. Бектасова[3],
**А. Б. Ергалиев[4], А. Д. Тастенов[5]*
[1,2,3,4,5]Торайгыров университет,
Республика Казахстан, г. Павлодар.
Поступило в редакцию 15.04.26.
Поступило с исправлениями 06.05.26.
Принято в печать 03.06.26.

ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТУ 65 ЛЕТ. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ РАБОТА НА ФАКУЛЬТЕТЕ ЭНЕРГЕТИКИ. ТРАДИЦИИ И ИННОВАЦИИ

В статье проведен анализ развития учебно-методической работы на факультете энергетики со дня начала деятельности Павлодарского индустриального института (ПИИ) (1 декабря 1960 года). ПИИ был открыт для обеспечения инженерами бурно развивающегося промышленно-энергетического и аграрного секторов экономики Павлодарского Приртышья. Толчком для столь стремительного равития экономики региона стало начало освоения в 1954 году целинных и залежных земель.

В 60-е годы прошлого столетия была неустойчивой ситуация с перечнем специальностей ПИИ вследствие того, что менялся профиль некоторых предприятий региона, что требовало срочной перестройки учебного процесса в целом (новое оснащение лабораторий и специализированных кабинетов, библиотечного фонда и др.), в том числе учебно-методической работы.

Развитию учебно-методической работы в соответствии с требованиями тогдашнего учебно-воспитательного процесса способствовало создание к началу 1970-х годов на факультете методической комиссии из числа наиболее опытных преподавателей. Первоочередная задача комиссии – это обеспечение учебного процесса учебно-методическими материалами при имевшемся в то время недостатке учебников и учебных пособий в библиотеке; кроме того, функции комиссии заключались и в оказании методической помощи молодым преподавателям

Одно из наиболее существенных достижени научно-методического совета института, созданного в конце 90-х годов, заключается в сформированном в начале 2000-х годов пакете нормативно-методических документов по организации и учебно-методическому обеспечению учебного процесса «Положение по формированию учебно-методических комплексов специальностей и дисциплин» (УМКС и УМКД), которые используются и в настоящее время. Усовершенствование УМКС и УМКД проводится систематически в соответствии с новыми нормативными документами министерства высшего образования и науки.

Профессорско-преподавательским составом факультета ведется планомерная работа по изданию электронных учебников и учебных пособий.

На современном этапе УМР факультета направлена на эффективное использование модульной формы обучения. Модульные программы применяются для обеспечения единого подхода при кредитной технологии обучения в вузах РК. Они создаются на основе зовательные программы разрабатываются в контексте компетентностной модели подготовки специалистов, что соответствует требованиям международного образовательного пространства.

Ключевые слова: учебно-методическая работа, моделирование, дуальное обучение, модульная программа, трудоустройство.

R. M. Mustafina[1], A. B. Sagyndyk[2], A. A. Bektasova[3],
**A. B. Yergaliyev[4], A. D. Tastenov[5]*
[1,2,3,4,5]Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 15.04.26.
Received in revised form 06.05.26.
Accepted for publication 03.06.26.

65TH ANNIVERSARY OF TORAIGHYROV UNIVERSITY. EDUCATIONAL AND METHODOLOGICAL WORK AT THE FACULTY OF ENERGY: TRADITIONS AND INNOVATIONS

This article analyzes the development of educational and methodological work at the Faculty of Energy from the establishment of the Pavlodar Industrial Institute (PII) on December 1, 1960. The institute was founded to supply engineers for the rapidly developing industrial, energy, and agricultural sectors of the Pavlodar Irtysh region. A major impetus for this rapid regional growth was the campaign for the development of virgin and fallow lands launched in 1954.

In the 1960s, the range of specialties offered by PII remained unstable due to changes in the profiles of several regional enterprises, which necessitated urgent restructuring of the educational process as a whole, including laboratory equipment, specialized classrooms, library resources, and educational and methodological support.

The advancement of educational and methodological work in line with the requirements of the educational process of that period was facilitated by the establishment, in the early 1970s, of a methodological commission composed of the most experienced faculty members. Its primary task was to provide the educational process with methodological materials amid a shortage of textbooks and teaching aids; in addition, the commission offered methodological support to early-career instructors.

One of the most significant achievements of the institute's Scientific and Methodological Council, established in the late 1990s, was the development in the early 2000s of a comprehensive set of regulatory and methodological documents governing the organization and methodological support of the educational process, namely the "Regulations on the Development of Educational and Methodological Complexes for Specialties and Disciplines" (EMCS and EMCD), which remain in use today. These complexes are systematically updated in accordance with new regulations issued by the Ministry of Higher Education and Science.

The faculty members continuously carry out planned work on the development and publication of electronic textbooks and teaching materials.

At the present stage, the faculty's educational and methodological work is focused on the effective implementation of modular learning. Modular programs are used to ensure a unified approach within the credit-based education system of higher education institutions in the Republic of Kazakhstan. They are developed on the basis of the State Compulsory Educational Standards and within a competency-based framework for specialist training, in alignment with the requirements of the international educational environment.

Keywords: educational and methodological work, modeling, dual education, modular program, employment.

МРНТИ 44.29.31

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/442-454

***О. Ш. Налибаев[1], Е. А. Сарсенбаев[2], Ә. К. Ерқоңыр[3]**

[1,2]Satbayev University,
Республика Казахстан, г. Алматы;
[3]Жезказганский университет,
Республика Казахстан, г. Жезказган.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5826-6003
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8887-1171
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3296-976X

КОНСТРУКТИВНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АКТИВНОЙ ЧАСТИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТМГВЭ-630/10-0,4 КАК МЕТОД СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

В статье представлено расчетно-экспериментальное обоснование конструктивной оптимизации активной части распределительного трансформатора ТМГвэ-630/10-0,4 номинальной мощностью 630 кВА, направленной на повышение его энергетической эффективности и снижение эксплуатационных потерь. Проведен комплексный анализ влияния изменения ключевых конструктивных параметров на характеристики устройства. В частности, рассмотрено влияние снижения рабочей магнитной индукции в магнитопроводе, применения холоднокатаной электротехнической стали с улучшенными магнитными свойствами толщиной 0,23 мм и удельными потерями 0,95 Вт/кг, а также использования алюминиевой фольги в обмотке низшего напряжения на величину потерь холостого хода и короткого замыкания.

Разработана расчетная схема, позволяющая количественно оценить совокупные магнитные и электрические потери с учетом особенностей выбранных материалов и конструктивных решений. Выполнена инженерная интерпретация полученных зависимостей, позволяющая обосновать выбор оптимальных параметров активной части трансформатора. Дополнительно проведена экспериментальная верификация предложенных решений на изготовленном опытном образце с использованием стандартных методов приемо-сдаточных испытаний.

По результатам испытаний установлено, что фактические значения потерь составили P_o = 577 Вт и $P_к$ = 5743 Вт, что свидетельствует о снижении удельных потерь по сравнению с типовыми аналогами. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода к модернизации активной части и демонстрируют его практическую применимость при разработке энергоэффективных распределительных трансформаторов среднего класса мощности с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: энергоэффективный трансформатор, активная часть, магнитопровод, электротехническая сталь, алюминиевая фольга, потери холостого хода, потери короткого замыкания.

Введение

В условиях роста энергопотребления, повышения стоимости электроэнергии и ужесточения требований к энергоэффективности электросетевого оборудования особое значение приобретает снижение эксплуатационных потерь в распределительных трансформаторах [1; 2]. Международные регуляторные подходы, включая Ecodesign для силовых трансформаторов и обновленные требования Министерства энергетики США, ориентируют производителей на снижение потерь холостого хода и короткого замыкания при сохранении надежности и ресурса оборудования 920.

Для распределительных сетей 6-10 кВ трансформаторы мощностью 400-1000 кВА являются базовым элементом подстанционного оборудования. При круглосуточной работе даже умеренное уменьшение удельных потерь приводит к значимому суммарному энергетическому эффекту. Поэтому повышение энергоэффективности в данном классе оборудования является не только задачей эксплуатационной экономичности, но и частью общей технической политики в области снижения сетевых потерь [3; 4].

Энергетические потери в силовом трансформаторе определяются двумя основными составляющими, а именно- потерями холостого хода P_o, возникающими в магнитопроводе, и потерями короткого замыкания $P_к$, связанными с активным сопротивлением обмоток и добавочными потерями в токоведущих элементах [5]. В этой связи целью работы является расчетно-экспериментальное обоснование конструктивных решений по модернизации активной части трансформатора ТМГвэ-630/10-0,4, направленных на снижение магнитных и электрических потерь.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

– выполнено расчетно-экспериментальное обоснование оптимизации активной части трансформатора ТМГвэ-630/10-0,4;

– предложено конструктивное сочетание пониженной рабочей индукции 1,57 Тл и применения алюминиевой фольговой обмотки НН;

– экспериментально подтверждено снижение потерь холостого хода и короткого замыкания в условиях промышленного изготовления.

В работе выполнены систематизация исходных параметров конструкции, аналитическое описание влияния принятых материалов и геометрических решений на уровень потерь, а также инженерная интерпретация результатов приемо-сдаточных испытаний изготовленного образца.

Материалы и методы

Исходные параметры исследуемого трансформатора приведены в таблице 1. Они соответствуют фактически изготовленному образцу ТМГвэ-630/10-0,4 и используются как базовые для оценки составляющих потерь холостого хода и короткого замыкания [6, с. 69–80].

Таблица 1 – Исходные данные проектируемого трансформатора

Параметр	Обозначение	Значение	Примечание
Номинальная мощность	S_n	630 кВА	трехфазный трансформатор
Номинальное напряжение ВН	UВН	10 кВ	линейное
Номинальное напряжение НН	UНН	0,4 кВ	линейное
Номинальная частота	f	50 Гц	
Группа соединения	-	D/Yn-11	по протоколу испытаний
Материал обмотки ВН	-	Al	алюминиевый проводник
Материал обмотки НН	-	Al-фольга	алюминиевая фольга
Толщина листа стали	t	0,23 мм	холоднокатаная электротехническая сталь
Удельные потери стали	pFe	0,95 Вт/кг	при f = 50 Гц и B ≈ 1,5 Тл
Индукция в магнитопроводе	B	1,57 Тл	при Dст = 211 мм
Диаметр стержня	Dст	211 мм	диаметр описанной окружности по стержню

Методика расчета основана на раздельном рассмотрении магнитных и электрических потерь. На первом этапе оцениваются потери холостого хода как сумма гистерезисной и вихревой составляющих, определяемых свойствами магнитопровода и режимом намагничивания. На втором этапе рассчитываются потери короткого замыкания, зависящие от активного сопротивления обмоток и добавочных потерь, связанных с рассеянием магнитного поля и неравномерностью распределения токов [7; 8]. Такой подход позволяет целенаправленно связать каждое конструктивное решение с соответствующим видом потерь.

Потери холостого хода и инженерная интерпретация их снижения

Потери холостого хода в рассматриваемом трансформаторе определяются, прежде всего, характером перемагничивания сердечника и свойствами электротехнической стали. Для аналитического описания примем разложение суммарных потерь на гистерезисную и вихревую составляющие.

$$P_0 = P_{\text{гист}} + \mathrm{P}_{\text{вихр}} \tag{1}$$

где $\mathrm{P}_{\text{гист}}$ – гистерезисные потери;

$\mathrm{P}_{\text{вихр}}$ – потери от вихревых токов.

Гистерезисные потери можно представить в виде зависимости

$$P_{\text{гист}} = k_h \cdot f \cdot B^{\alpha} \cdot m \tag{2}$$

где k_h – коэффициент гистерезисных потерь материала;

f – частота сети;

B – магнитная индукция;

α – показатель степени для электротехнической стали;

m – масса магнитопровода.

Для принятой стали с удельными потерями 0,95 Вт/кг при индукции около 1,5 Тл оценка рабочего уровня потерь при B = 1,57 Тл выполняется по степенной зависимости

$$\begin{gathered} \mathrm{p}_{\text{уд}}(1{,}57) = 0{,}95 \cdot \left(\frac{1{,}57}{1{,}5}\right)^2 \\ \mathrm{p}_{\text{уд}}(1{,}57) \approx 1{,}04\ \text{Вт/кг} \end{gathered} \tag{3}$$

Инженерно это означает, что выбор умеренной рабочей индукции сдерживает непропорциональный рост потерь при приближении к области насыщения. Иными словами, дальнейшее увеличение B после уровня 1,6-1,7 Тл становится энергетически нецелесообразным, выигрыш в массогабаритных показателях оказывается ниже, чем рост потерь в магнитопроводе [9, с. 515–528].

Вихревые потери в магнитопроводе аналитически описываются выражением

$$P_{вихр} = k_e \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot t^2 \cdot m \quad (4)$$

где k_e – коэффициент материала; t – толщина листа стали.

Снижение толщины листа до 0,23 мм и применение шихтования с косым стыком step-lap оказывают комплексное влияние на уменьшение вихревых потерь. Уменьшается длина замкнутых контуров токов, снижаются локальные зоны концентрации магнитного потока в углах сердечника, улучшается распределение магнитного поля по стыкам пластин. С инженерной точки зрения именно сочетание материала и технологии сборки магнитопровода обеспечивает устойчивое снижение P_o без перехода к более дорогим типам стали [10].

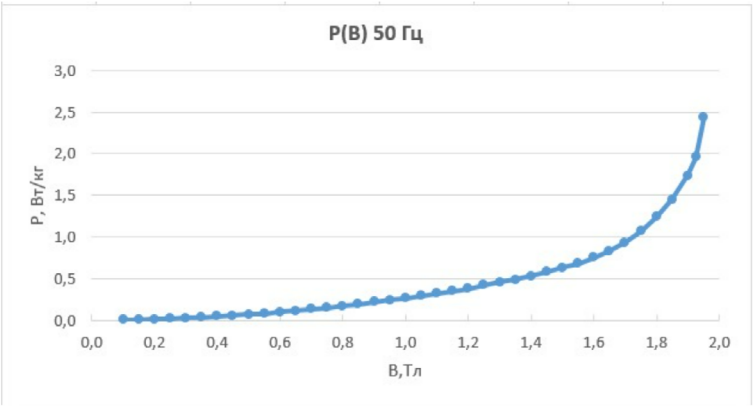


Рисунок 1 – Зависимость удельных потерь электротехнической стали от магнитной индукции при f = 50 Гц

Кривая на рисунке 1 имеет выраженный нелинейный характер. После 1,6-1,7 Тл наблюдается ускоренный рост удельных потерь, что подтверждает корректность выбора рабочей индукции 1,57 Тл для рассматриваемой конструкции. По результатам приемо-сдаточных испытаний фактические потери холостого хода составили P_o = 577 Вт, что подтверждает адекватность принятой магнитной системы и выбранных параметров магнитной нагрузки. Интерпретация влияния принятых конструктивных решений на уровень потерь приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Инженерная интерпретация влияния принятых конструктивных решений на уровень потерь

Конструктивное решение	Механизм влияния	Инженерный эффект
Снижение индукции до 1,57 Тл	Ограничение интенсивности перемагничивания и удаление режима от области насыщения	Стабилизация гистерезисных потерь и предотвращение их резкого роста
Сталь 0,23 мм с удельными потерями 0,95 Вт/кг	Снижение потерь в листовом материале и уменьшение толщины токовых контуров	Уменьшение суммарных магнитных потерь
Step-lap шихтование	Снижение локальных концентраций магнитного потока в зонах стыков	Сокращение вихревых потерь и улучшение распределения магнитного поля
Алюминиевая фольга в обмотке НН	Выравнивание плотности тока и уменьшение рассеяния поля в проводнике	Снижение добавочных потерь и улучшение тепловой устойчивости

Потери короткого замыкания и влияние фольговой обмотки НН

Потери короткого замыкания формируются в обмотках трансформатора и зависят от величины тока, активного сопротивления проводников и добавочных потерь, обусловленных рассеянием магнитного поля. Базовая составляющая P_k определяется зависимостью

$$P_k = I^2 \cdot R_{экв} \quad (5)$$

где I – ток нагрузки;

$R_{экв}$ – эквивалентное активное сопротивление обмоток.

Номинальные токи для исследуемого трансформатора рассчитываются по выражениям

$$I_{НН} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{НН}}$$
$$I_{НН} = \frac{630000}{1{,}732 \cdot 400} \quad (6)$$
$$I_{НН} \approx 909\ A$$
$$I_{ВН} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН}}$$

$$I_{BH} = \frac{630000}{1{,}732 \cdot 10000} \qquad (7)$$
$$I_{BH} \approx 36{,}4\ A$$

Сопротивление проводника определяется классической зависимостью

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s} \qquad (8)$$

где ρ – удельное сопротивление материала;

l – длина проводника;

S – площадь поперечного сечения.

Для алюминия принимаем удельное электрическое сопротивление $\rho_{Al} = 2{,}82 \cdot 10^{-8}\ OM \cdot м$. Из данного выражения следует, что снижение сопротивления достигается либо за счет уменьшения длины витка, либо за счет оптимизации эффективного сечения и характера распределения тока в проводнике.

Применение алюминиевой фольги в обмотке низшего напряжения обеспечивает следующие возможности, указанные на рисунке 2 [11].

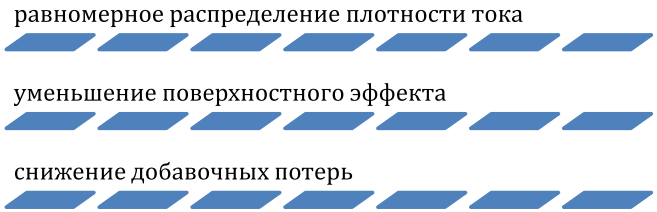


Рисунок 2 – Возможности алюминиевой фольги в обмотке низшего направления

Для инженерной практики это важно тем, что фольговая обмотка одновременно улучшает электрические и тепловые условия работы без существенного усложнения технологии изготовления.

Добавочные потери можно представить в обобщенном виде как

$$P_{доп} = k_{доп} \cdot I^2 \qquad (9)$$

где коэффициент kдоп характеризует влияние рассеяния поля и неравномерности распределения тока в обмотке. При фольговой конструкции величина $k_{доп}$ уменьшается, что непосредственно влияет на снижение суммарных потерь короткого замыкания.

Результаты и обсуждение

Экспериментальная проверка выполнена на изготовленном образце трансформатора ТМГвэ-630/10-0,4, произведенном на АО «Кентауский трансформаторный завод». Приемо-сдаточные испытания проведены в аккредитованной лаборатории в соответствии с ISO/IEC 17025. По результатам испытаний фактические потери короткого замыкания составили P_k = 5743 Вт, а потери холостого хода – P_o = 577 Вт. Как видно в таблице 3, согласование расчетных и экспериментальных данных подтверждает корректность принятых инженерных решений и реализуемость предложенной конструкции в условиях промышленного производства.

Таблица 3 – Сопоставление экспериментальных результатов с контрольными и нормативными ориентирами

Параметр	Контрольный ориентир	Получено при испытаниях	Оценка
P_0	Пониженный уровень потерь для энергоэффективного исполнения; приемо-сдаточный контроль по программе испытаний	577 Вт	Соответствует
P_k	Норма по протоколу испытаний: 6160 Вт (допуск +10 %)	5743 Вт	Соответствует
Нормативная база	СТО 34.01-3.2-011-2019	-	Учтена при интерпретации результатов

Полученные результаты показывают, что снижение потерь в рассматриваемой конструкции обеспечивается не отдельным приемом, а совокупностью взаимосвязанных технических решений. Снижение рабочей индукции влияет, прежде всего, на гистерезисную составляющую. Малая толщина стали и step-lap шихтование уменьшают вихревые потери. Применение алюминиевой фольги в обмотке НН снижает как активные, так и добавочные потери. С инженерной точки зрения это означает, что рациональная оптимизация активной части должна рассматриваться как согласование магнитных, электрических и тепловых факторов, а не как локальное усовершенствование одного узла.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные результаты могут быть использованы при проектировании энергоэффективных распределительных трансформаторов мощностью 400-1000 кВА, а также

при модернизации существующих конструкций для распределительных сетей 6-10 кВ. Предложенный подход может быть применен на стадии конструкторской проработки при выборе материалов магнитопровода, рабочей индукции и типа обмотки низшего напряжения.

Перспективы дальнейших исследований связаны с применением FEM-моделирования для уточнения распределения магнитных потоков и добавочных потерь, а также с развитием цифровых методов мониторинга состояния трансформаторов, позволяющих оценивать изменение потерь в эксплуатации. Дополнительный интерес представляет анализ теплового поведения фольговых обмоток при несимметричных режимах нагрузки и сравнение различных марок электротехнической стали по критерию интегральной энергоэффективности.

Выводы

В работе выполнено расчетно-экспериментальное обоснование конструктивной оптимизации активной части распределительного трансформатора ТМГвэ-630/10-0,4 мощностью 630 кВА.

Снижение магнитных потерь достигнуто за счет применения холоднокатаной электротехнической стали толщиной 0,23 мм с удельными потерями 0,95 Вт/кг и выбора рабочей индукции 1,57 Тл при диаметре стержня 211 мм.

Снижение потерь короткого замыкания обеспечено оптимизацией плотности тока и применением алюминиевой фольги в обмотке низшего напряжения.

По результатам приемо-сдаточных испытаний получены значения P_o = 577 Вт и P_k = 5743 Вт. Полученные данные согласуются с расчетной логикой работы трансформатора и подтверждают эффективность принятых конструктивных решений.

Предложенные инженерные решения формируют устойчивую модель повышения энергоэффективности распределительных трансформаторов среднего класса мощности и могут служить основой для дальнейшей оптимизации их конструкции с учетом требований энергосбережения и современной нормативной базы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 IEEE Std C57.12.00-2015. Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. – New York : IEEE, 2015.

2 U.S. Department of Energy. Energy Conservation Program: Test Procedures for Distribution Transformers. – Washington : U.S. Department of Energy, 2016.

3 ГОСТ 11677-2020. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2020.

4 Commission Regulation (EU) 2019/1783 of 1 October 2019 implementing Directive 2009/125/EC with regard to ecodesign requirements for power transformers. – Brussels : European Commission, 2019.

5 СТО 34.01-3.2-011-2019. Трансформаторы силовые распределительные 6–10 кВ мощностью 63–2500 кВА. Требования к уровню потерь холостого хода и короткого замыкания. – Москва, 2019.

6 **Наумов, И. И.** Комбинированное техническое средство для повышения качества и снижения потерь электроэнергии в низковольтных электрических сетях // Вестник Курганской ГСХА. 2024. – №1 – С. 69–80.

7 **Бойчук, В. С.** Электрооборудование энергетических систем: учебное пособие /В. С. Бойчук, А. В. Куксин. – М. : Инфра-Инженерия, 2021. – 268 с.

8 **Алюнов, А. Н.** Схемы систем электроснабжения и проектные решения: учебное пособие / Алюнов А. Н., Вяткина О. С., Смирнов И. Н. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2022. – 83 с.

9 **Kulkarni, S. V., Khaparde, S. A.** Transformer Engineering: Design and Practice. – New York : Marcel Dekker, 2012. – 720 p.

10 **Harlow, J.** Electric Power Transformer Engineering. – Boca Raton : CRC Press LLC, 2017. – 241 p.

11 **McLyman, C.** Transformer and Inductor Design Handbook. – 4th ed. – Boca Raton : CRC Press, 2011.

REFERENCES

1 IEEE Std C57.12.00-2015. Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. New York : IEEE, 2015.

2 U. S. Department of Energy. Energy Conservation Program : Test Procedures for Distribution Transformers. Washington : U. S. Department of Energy, 2016.

3 GOST 11677-2020. Transformatory silovye. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Power transformers. General technical specifications] [Text]. M. : Standartinform, 2020.

4 Commission Regulation (EU) 2019/1783 of 1 October 2019 implementing Directive 2009/125/EC with regard to ecodesign requirements for power transformers. Brussels : European Commission, 2019.

5 STO 34.01-3.2-011-2019. Transformatory silovye raspredelitelnye 6–10 kV moshchnostyu 63–2500 kVA. Trebovaniya k urovnyu poter kholostogo khoda i korotkogo zamykaniya [Distribution power transformers 6–10 kV with capacity of 63–2500 kVA. Requirements for no-load and short-circuit losses] [Text]. Moscow, 2019.

6 **Naumov, I. I.** Kombinirovannoe tekhnicheskoe sredstvo dlya povysheniya kachestva i snizheniya poter elektroenergii v nizkovoltnykh elektricheskikh setyakh [Combined technical solution for improving quality and reducing power losses in low-voltage electrical networks]. Vestnik Kurganskoi GSKhA, 2024, No. 1, pp. 69–80.

7 **Boichuk, V. S.** Elektrooborudovanie energeticheskikh sistem : uchebnoe posobie [Electrical equipment of power systems: textbook]. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2021. 268 p.

8 **Alyunov, A. N.** Skhemy sistem elektrosnabzheniya i proektnye resheniya : uchebnoe posobie [Power supply system schemes and design solutions: textbook]. Vologda: Vologda State University, 2022. 83 p.

9 **Kulkarni, S. V., Khaparde, S. A.** Transformer Engineering : Design and Practice. New York : Marcel Dekker, 2012. 720 p.

10 **Harlow, J.** Electric Power Transformer Engineering. Boca Raton : CRC Press LLC, 2017. 241 p.

11 **McLyman, C.** Transformer and Inductor Design Handbook. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2011.

Поступило в редакцию 09.04.26.
Поступило с исправлениями 28.04.26.
Принято в печать 02.09.26.

**О. Ш. Налибаев[1], Е. А. Сәрсенбаев[2], Ә. К. Ерқоңыр[3]*
[1,2]Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[3]Жезқазған университеті, Қазақстан Республикасы, Жезқазған қ.
09.04.26 ж. баспаға түсті.
28.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
02.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТМГВЭ-630/10-0,4 ТАРАТУ ТРАНСФОРМАТОРЫНЫҢ БЕЛСЕНДІ БӨЛІГІН КОНСТРУКТИВТІ ОҢТАЙЛАНДЫРУ – ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ШЫҒЫНДАРДЫ ТӨМЕНДЕТУ ӘДІСІ РЕТІНДЕ

Мақалада номиналды қуаты 630 кВА болатын ТМГвэ-630/10-0,4 тарату трансформаторының белсенді бөлігін конструктивтік оңтайландырудың есептік-тәжірибелік негіздемесі ұсынылған. Зерттеу трансформатордың энергетикалық тиімділігін арттыруға және пайдалану барысында туындайтын шығындарды азайтуға бағытталған. Жұмыста негізгі конструктивтік параметрлердің өзгеруінің құрылғы сипаттамаларына әсері жан-жақты талданған. Атап айтқанда, магнитөткізгіштегі жұмыс магниттік индукциясын төмендетудің, қалыңдығы 0,23 мм және меншікті шығыны 0,95 Вт/кг болатын суықтай илектелген электротехникалық болатты қолданудың, сондай-ақ төменгі кернеу орамында алюминий фольгасын пайдаланудың бос жүріс және қысқа тұйықталу шығындарына әсері қарастырылған.

Таңдалған материалдар мен конструктивтік шешімдердің ерекшеліктерін ескере отырып, магниттік және электрлік шығындарды сандық бағалауға мүмкіндік беретін есептік схема әзірленді. Алынған нәтижелерге инженерлік түсіндірме және трансформатордың белсенді бөлігінің оңтайлы параметрлерін таңдауға негіз берілді. Сонымен қатар, ұсынылған шешімдер тәжірибелік үлгіде тексеріліп, қабылдау-тапсыру сынақтары стандартты әдістер бойынша жүргізілді.

Сынақ нәтижелері бойынша нақты шығындар P_o = 577 Вт және P_k = 5743 Вт мәндерін көрсетті. Бұл көрсеткіштер ұсынылған тәсілдің тиімділігін дәлелдейді және орта қуатты энергия үнемдейтін тарату трансформаторларын әзірлеуде практикалық тұрғыдан қолдануға болатындығын айқындайды.

Кілтті сөздер: энергия үнемдейтін трансформатор, белсенді бөлік, магнитөткізгіш, электротехникалық болат, алюминий фольгасы, бос жүріс шығындары, қысқа тұйықталу шығындары.

**O. Sh. Nalibayev[1], Y. A. Sarsenbayev[2], A. K. Yerqongyr[3]*
[1,2]Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
[3]Zhezkazgan University, Republic of Kazakhstan, Zhezkazgan.

Received 09.04.26.
Received in revised form 28.04.26.
Accepted for publication 02.09.26.

CONSTRUCTIVE OPTIMIZATION OF THE ACTIVE PART OF A TMGVE-630/10-0.4 DISTRIBUTION TRANSFORMER AS A METHOD FOR REDUCING ENERGY LOSSES

This article presents a theoretical and experimental justification for the design optimization of the active part of the TMGve-630/10-0.4 distribution transformer with a rated capacity of 630 kVA, aimed at improving its energy efficiency and reducing operating losses. A comprehensive analysis of the effect of changes in key design parameters on the device's characteristics was conducted. In particular, the study examined the effect of reducing the operating magnetic flux density in the magnetic circuit, the use of cold-rolled electrical steel with improved magnetic properties, a thickness of 0.23 mm, and specific losses of 0.95 W/kg, as well as the use of aluminum foil in the low-voltage winding on the magnitude of no-load and short-circuit losses.

A calculation scheme has been developed that allows for a quantitative assessment of the total magnetic and electrical losses, taking into account the characteristics of the selected materials and design solutions. An engineering interpretation of the obtained dependencies was performed, allowing the selection of optimal parameters for the active part of the transformer to be justified. Additionally, experimental verification of the proposed solutions was conducted on a manufactured prototype using standard acceptance test methods.

Test results showed that the actual power loss values were P_o = 577 W and P_k = 5743 W, indicating a reduction in specific power loss compared to standard counterparts. The results obtained confirm the effectiveness of the proposed approach to modernizing the active part and demonstrate its practical applicability in the development of energy-efficient medium-power distribution transformers with improved operational characteristics.

Keywords: energy-efficient transformer, active part, magnetic core, electrical steel, aluminum foil, no-load losses, short-circuit losses.

МРНТИ 44.31; 68.85
https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/455-474

Д. Р. Омар[1], Р. А. Омаров[2], Е. С. Умбетов[3], С. Т. Демесова[4], *Н. И. Молдыбаева[5]
[1,2]ТОО «НПЦ «Агроинженерии», заведующий лаборатории: «Энергосбережения и зеленой энергетики», Республика Казахстан, г. Алматы;
[1,2]Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы;
[3]Казахский национальный женский педагогический университет, Республика Казахстан, г. Алматы;
[4,5]Казахский национальный аграрный исследовательский университет, Республика Казахстан, г. Алматы.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7857-0316
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9961-7657
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6645-3489
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9224-6460
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5016-8800
*e-mail: moldybayeva78@mail.ru

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ПРИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ АГРОСЕКТОРА КАЗАХСТАНА

Существенное снижение цен на солнечные панели в последние 15 лет, повышение характеристик и надежности систем накопления энергии (BESS) на фоне практически неизменной стоимости дизель-генераторной электроэнергии (0.20–0.21 $/кВт·ч), создали объективные предпосылки для практической реализации автономного энергообеспечения удалённых объектов Казахстана с использованием фотоэлектрических (PV+BESS)-станций. Целью работы является технико-экономическая оценка применения PV+BESS-систем в различных климатических зонах Казахстана и сравнение их с традиционными дизель-генераторными установками (ДГУ). Методикой исследований является: анализ литературных источников, расчёт годовой выработки (PV+BESS)-установок, определение требуемой установленной мощности PV-панелей и ёмкости аккумуляторных батарей (BESS), оценка себестоимости

электроэнергии по показателю удельной приведённой стоимости (LCOE). Исследования выполнены для периода 2010–2025 гг. с учётом региональных климатических условий (Юг, Центр, Север Казахстана), динамики цен на PV-панели и BESS. Установлено, что за искомый период стоимость PV-панелей снизилась на 89–95 %, что привело к резкому снижение себестоимости (PV+BESS)-электроэнергии до 0,09–0,12 $/кВт·ч в 2025 году. При этом, себестоимость ДГУ-электроэнергии осталась практически неизменной, на уровне 0,20–0,21 $/кВт·ч. Подтверждено, что после 2017 года (PV+BESS)-станции стали экономически более эффективными по сравнению с ДГУ во всех климатических регионах Казахстана. Установлено, что увеличение ёмкости BESS, с целью продления времени автономной работы (PV+BESS)-станции, приводит к существенному росту стоимости электроэнергии. Полученные результаты подтверждают целесообразность внедрения (PV+BESS)-станций для автономного электроснабжения сельскохозяйственных объектов, где дизель-генераторные установки используются в качестве аварийных резервных источников, это подчеркивает необходимость оптимизации как установленной мощности, так и продолжительности работы дизель-генераторов.

Ключевые слова: фотоэлектрическая станция; PV+BESS; аккумуляторы (BESS); гибридная система; удельная стоимость электроэнергии; коэффициент эффективности PV-панели.

Введение

Стратегия, принятая Республикой Казахстаном достижения углеродной нейтральности к 2060 г. для обеспечения устойчивого будущего и решения проблем, связанных с изменением климата, формирует долгосрочный спрос на чистые технологии производства электрической энергии [1; 2]. В условиях резко континентального климата Казахстана фотоэлектрические системы относятся к числу наиболее доступных и широко применимых технологий возобновляемой энергии (PV-станции), которые обладают достаточным потенциалом для удовлетворения энергетических потребностей.

Сельскохозяйственный сектор, который изначально базируется на солнечной энергии, также нуждается в расширении технологических возможностей и методов в различных целях. Например, широко используются тепловые свойства солнечной энергии для сушки продуктов питания, других сельскохозяйственных культур, что является её прямым использованием. Однако их практическое внедрение требует решения технико-экономической

задачи, касающейся выработки и удельной стоимости PV-энергии, сезонности и потенциала солнечной энергии, стоимости компонентов PV-станции [3].

В литературе оценка фотоэлектрических (ФЭ) систем традиционно основывается на двух ключевых показателях: годовой выработке энергии на 1 кВт установленной мощности ФЭ и коэффициенте производительности (PR). Последний отражает долю годовой энергии, вырабатываемой на выходе инвертора, относительно теоретически ожидаемой выработки энергии, с учетом фактических потерь системы [4; 5; 6; 7]. Для Казахстана годовая выработка энергии на 1 кВт установленной мощности ФЭ обычно принимается в диапазоне от 1200 до 1600 кВт·ч/кВт·год в зависимости от региона и ориентации модулей. В некоторых исследованиях приводятся значения годовой выработки в диапазоне 1298–1534 кВт·ч/кВт·год [4; 5]. Для адекватного моделирования выработки энергии ФЭ обычно вводится коэффициент эффективности 0,75–0,85 для учета локальных факторов, таких как снежный покров, накопление пыли и нагрев модулей [7; 8].

Дизель-генераторные установки (ДГУ), остаются основными источниками электроэнергии на многих удаленных объектах. В последние годы устойчивое снижение цен на PV-панели и аккумуляторные батареи существенно повлияло на повышение конкурентоспособности PV+BESS-систем по сравнению с ДГУ. Международные аналитические обзоры показывают, что стоимость производства солнечной энергии за последние годы значительно снизилась, что открывает путь для внедрения гибридных энергетических систем [9; 10]. В ряде исследований установлена зависимость экономических показателей PV+BESS от региона. Например, эффективность системы постепенно повышается от южного региона к центральному и северному, в то время как цены на фотоэлектрические модули и батареи продолжают снижаться [11; 12].

Как обзорные, так и прикладные исследования были сосредоточены на оптимизации гибридных конфигураций, таких как PV + BESS и PV + BESS + дизельные генераторы. Гибридные системы, сочетающие PV с ветровыми турбинами или микрогидроэнергетикой, также исследовались [7; 13–16]. Обзоры гибридных систем PV–ветровая энергетика и методов их оптимизации подчеркивают важность сочетания моделирования ресурсов (PVOUT, ветровой потенциал) со стохастической оптимизацией и технико-экономическим анализом (LCOE, NPV и чувствительность к цене топлива и стоимости батарей) [13; 14]. Для удаленных площадок обычно используются такие инструменты, как HOMER, PVsyst и специализированные сценарные модели. Несколько исследований также показывают, что стратегии управления, основанные на прогнозировании

нагрузки и погоды, могут увеличить долю возобновляемых источников энергии и снизить зависимость от резервных дизельных генераторов [15; 17].

Интеграция фотоэлектрических элементов с тепловыми насосами и фотоэлектрическими тепловыми (ФТ) коллекторами рассматривается как способ повышения общей полезной выработки энергии системы – обеспечения электроэнергии вместе с теплом или охлаждением – и улучшения ее экономической эффективности в агропромышленных приложениях, таких как обогрев теплиц, сушка урожая и холодильные установки в холодовой цепи [16, 18]. Однако обзоры указывают на недостаток длительных полевых испытаний и отсутствие единой методологии оценки производительности этих комбинированных систем в реальных условиях [18; 19].

В контексте Казахстана по-прежнему наблюдается нехватка полевых данных по фотоэлектрическим установкам и гибридным системам, работающим в континентальном климате с длинными снежными зимами; лишь ограниченное количество региональных исследований LCOE учитывает логистику и цены на дизельное топливо; а решения PV + микрогидроэнергетика для горных районов и гибриды PV + ветроэнергетика для ветреных регионов остаются недостаточно оцененными [2, 12, 13]. Исследования в области хранения энергии также показывают, что неограниченное расширение мощностей BESS экономически не оправдано, что делает необходимым оптимизацию размера батарей с учетом требуемой зимней автономности (8–12 ч) и стоимости жизненного цикла [10].

Исследования показывают, что проектированию автономных систем гибридных систем должна предшествовать оценка ресурсной базы планируемых ВИЭ (PV-потенциал, ветровой потенциал, гидроресурс) [2; 5].

Обязательной частью технико-экономического обоснования является анализ цен PV-модулей, коэффициент эффективности PV-панелей и стоимости топлива для типовых удалённых объектов (ферма, ветсан-посты, склады) [9; 13; 15].

Необходимым шагом для количественной оценки реального износа, анализа влияния снежного покрова и подтверждения коэффициента эффективности в континентальном климате является проведение пилотных проектов, включающих периоды мониторинга не менее двух-трех лет [5; 18].

В сельскохозяйственном секторе регионы с подтвержденными ветровыми и водными ресурсами могут отдавать приоритет гибридным конфигурациям, таким как фотоэлектрические системы + системы хранения энергии + дизельные генераторы и фотоэлектрические системы + системы хранения

энергии + теплоснабжение, а также фотоэлектрические системы + ветровые турбины и фотоэлектрические системы + микрогидроэнергетика [14; 16].

Анализ литературы показывает, что снижение цен на фотоэлектрические панели и системы хранения энергии превращает фотоэлектрические модули и гибридные конфигурации возобновляемой энергии в практичные решения для автономного электроснабжения удаленных объектов. В Казахстане приоритетной задачей является получение достоверных данных о потенциале возобновляемых ресурсов, выбранных для проектирования системы; эти данные составляют основу для построения региональной технико-экономической модели, учитывающей логистику и результаты пилотных проектов.

В связи с приведенным, актуальной задачей является анализ и оценка технико-экономической эффективности гибридной системы: PV+BESS в производственных процессах агросектора Казахстана.

Материалы и методы

Одним из основных показателей фотоэлектрического модуля является коэффициент производительности (PR), который количественно определяет долю годовой энергии, фактически вырабатываемой на выходе инвертора, относительно теоретически ожидаемой выработки и рассчитывается с использованием уравнения (6):

$$PR = \frac{E_{AC}/P_{PV}}{H_{SE}/G_{PV}} \quad (1)$$

где E_{AC} – годовая выработка энергии на выходе инвертора, кВт·ч; P_{PV} – установленная мощность фотоэлектрических панелей, кВт; H_{SE}– солнечная радиация в плоскости массива кВт·ч/м², G_{PV}=1 кВт/м².

Когда расчет PR оправдан, учитываются все реальные потери: изменения эффективности панели из-за температуры; потери при преобразовании постоянного тока в переменный в инверторе; эффективность MPPT-инвертора; естественное затенение, вызванное снегом, пылью, загрязнением, износом или простоями; и потери, связанные с подзарядкой батареи (BESS – Battery Energy Storage System).

Необходимая установленная мощность фотоэлектрических панелей рассчитывается по формуле:

$$P_{PV} = \frac{E_{эл.баз}}{Y_{spec} \cdot PR} \quad (2)$$

где: $E_{эл.баз}$ – годовая потребность объекта в электроэнергии; Y_{spec} – удельная выработка фотоэлектрической энергии кВт·ч/кВт установленной мощности солнечных панелей, в год.

Для Казахстана Y_{spec} обычно составляет 1200–1600 кВт·ч/кВт·год [4]. При расчете мощности для зимних условий используется уменьшенное значение Y_{spec}, принимаемое равным 35–55 % от среднегодового значения для наклона модуля на «широту + 15°».

Емкость аккумуляторов для фотоэлектрической системы определяется критическими нагрузками и необходимостью обеспечения 12 часов автономной работы в темное время суток. Поскольку батареи не должны разряжаться ниже 50–70 % от своей номинальной емкости, размер установленного аккумуляторного блока примерно на 70 % больше теоретического минимума.

Технико-экономическая оценка основана на общепринятом международном показателе приведенной стоимости электроэнергии ($LCOE_{el}$ – Levelized Cost of Electricity) определяется как общие затраты за весь срок службы проекта, деленные на суммарную выработку электроэнергии ($E_{del,t}$) системой PV + BESS за весь срок ее эксплуатации. В состав затрат входят первоначальные затраты на приобретение и установку, а также ежегодные эксплуатационные расходы и расходы на техническое обслуживание в последующие годы.

$$LCOE_{el} = \frac{I_0^{PV+BESS} + \sum_{t=1}^{N} C_{opt} - SV_N^{PV+BESS}}{\sum_{t=1}^{N} E_{del\,t}} \quad (3)$$

где $I_0^{PV+BESS}$ – обычно обозначаемое как первоначальные инвестиции – представляет собой единовременные капитальные затраты на приобретение комплекта PV + BESS вместе с его силовыми электронными компонентами.

$\sum_{t=1}^{N} C_{opt}$ (эксплуатационные расходы) – это сумма всех эксплуатационных расходов и расходов на замену компонентов, понесенных за весь срок службы проекта, составляющий N лет;

C_{opt} – это эксплуатационные расходы в конкретном году t;

$SV_N^{PV+BESS}$ представляет собой чистую экономию затрат на энергию, достигнутую за N-летний период;

и $\sum_{t=1}^{N} E_{del,t}$ – это общее количество полезной электроэнергии, выработанной системой за эти N лет.

Единовременные капитальные затраты рассчитываются как сумма затрат на приобретение PV-панелей (I_0^{PV}) и на приобретение аккумуляторов (I_0^{BESS}):

$$I_0^{PV+BESS} = I_0^{PV} + I_0^{BESS} \quad (4)$$

Годовые оперативные затраты рассчитываются, как сумма эксплуатационных ($C_o^{PV+BESS}$) и затрат на замену элементов ($C_{rep}^{PV+BESS}$):

$$C_{op}^{PV+BESS} = C_o^{PV+BESS} + C_{rep}^{PV+BESS} \quad (5)$$

Из (5) выводится формула для расчета дисконтированных оперативных затрат за расчетный период, N:

$$\sum_{t=1}^{N} C_{opt} = \sum_{t=1}^{N} \frac{C_{O\&M,t}^{PV+BESS} + C_{rep,t}^{PV+BESS}}{(1+r)^t} \quad (6)$$

где: r – ставка дисконтирования, используемая для приведения стоимости к соответствующему году эксплуатации, t.

Чистая приведённая экономия за расчётный период эксплуатации, получаемая за счёт внедрения системы PV+BESS по сравнению с базовым вариантом энергоснабжения рассчитывается по формуле:

$$SV_N^{PV+BESS} = \sum_{t=1}^{N} \frac{C_t^{base} - C_t^{PV+BESS}}{(1+r)^t} - I_0^{PV+BESS} \quad (7)$$

где: C_t^{base} – эксплуатационные затраты базового варианта, в соответствующий год, t;

$C_t^{PV+BESS}$ – эксплуатационные затраты нового варианта, в соответствующий год, t.

Результаты и обсуждение

На рынке Казахстана имеются различные типы PV-панелей. На рисунке 1 показан график изменения стоимости моно-, поликристаллических и тонкопленочных PV-панелей в исследуемый период, с 2010 по 2025 годы.

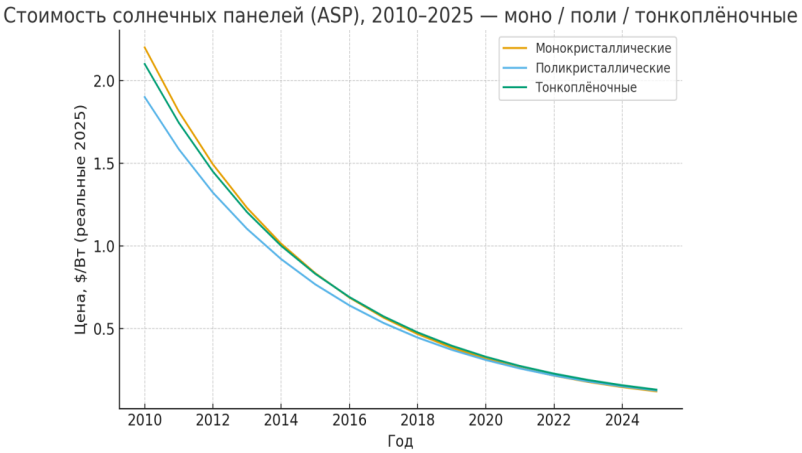


Рисунок 1 – График изменения стоимости PV-панелей в исследуемый период, с 2010 по 2025 годы

График свидетельствует, что за счёт масштабирования производства и технологического прогресса в исследуемый период (2010-2025 гг.) произошло резкое снижение стоимости PV-панелей на 89–95 %. Этому способствовало повышение спроса на фотоэлектрические панели, вызвавшее значительное расширение производственных мощностей и внедрение более современных технологических процессов. Анализ показывает резкое снижение стоимости: монокристаллические модули подешевели с 2,20 до 0,12 доллара за ватт, поликристаллические – с 1,90 до 0,125 доллара за ватт, а тонкопленочные модули – с 2,10 до 0,13 доллара за ватт. К 2025 году цены на все три технологии сблизились примерно до 0,12–0,13 доллара за ватт.

Однако монокристаллические панели производят больше энергии на той же площади поверхности. Их КПД составляет 20–23 %, тогда как поликристаллические модули достигают лишь 17–19 %. Следовательно, удельные затраты на монтажные конструкции, сваи, компоненты электрического баланса системы и установку примерно на 5–15 % ниже при использовании монокристаллической технологии. Монокристаллические модули также испытывают меньшие потери при высоких температурах, с температурным коэффициентом 0,30–0,35 % / °C по сравнению с 0,38–0,43 % / °C для поликристаллических элементов. В результате отрасль в значительной степени перешла на монокристаллические панели,

что повысило надежность и гарантийное обслуживание, а также упростило и снизило стоимость поставок, запасных частей и технической поддержки.

На рисунке 2 показана динамика удельной стоимости электроэнергии, вырабатываемой монокристаллическими фотоэлектрическими системами и дизельными генераторами, с 2010 по 2025 год в различных климатических зонах Казахстана. Стоимость электроэнергии варьируется от примерно 0,62 долл. США за кВт·ч в южных областях до около 0,71 долл. США за кВт · ч в центральной части страны и до 0,80 долл. США за кВт · ч в северных регионах.

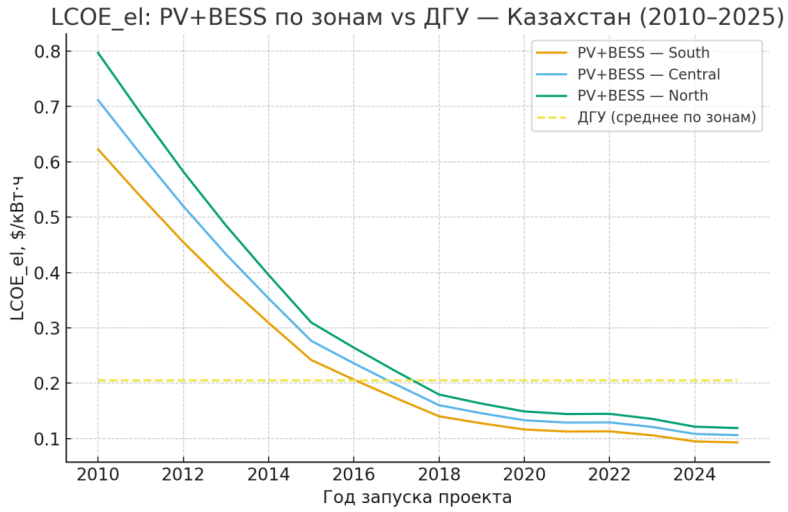


Рисунок 2 – Изменение удельной приведенной стоимости электроэнергии ($LCOE_{el}$) для монокристаллических фотоэлектрических панелей и дизель-генераторных установок в различных климатических зонах Казахстана с 2010 по 2025 год.

Электроэнергия, вырабатываемая дизельными двигателями (желтая пунктирная линия), также оказалась дорогой: при цене дизельного топлива около 0,54 доллара за литр ее стоимость составила примерно 0,20-0,21 доллара за кВт · ч.

К 2025 году цена электроэнергии, вырабатываемой солнечными батареями с накопителями энергии (PV + BESS), резко снизилась – примерно до 0,09 доллара за кВт·ч на юге, 0,11 доллара в центре и 0,12 доллара на севере.

Стоимость электроэнергии, вырабатываемой дизельными двигателями, практически не изменилась, оставаясь на уровне 0,20-0,21 доллара за кВт · ч, поскольку 80-90 процентов их удельной стоимости электроэнергии (LCOE) обусловлено топливом, цены на которое росли в соответствии с рыночными ценами. В результате к 2025 году электроэнергия, вырабатываемая солнечными батареями с накопителями энергии, стала в 1,7-2,3 раза дешевле, чем электроэнергия, вырабатываемая дизельными двигателями.

Ценовое равенство наблюдалось в разное время в Казахстане: примерно в 2015-2016 годах на юге, в 2016-2017 годах в центре и в 2017–2018 годах на севере. В дальнейшем ожидается дальнейшее снижение стоимости систем PV + BESS, что еще больше увеличит разрыв с дизельной генерацией.

Основные причины снижения себестоимости PV+BESS-энергии, как было приведено выше: снижение стоимостей солнечных панелей, до 10–15 раз, снижение стоимости аккумуляторов и повышении их надёжности и соответствующее удешевление их замены, которая осуществляется через 12 лет эксплуатации.

На региональном уровне годовая выработка электроэнергии от солнечных электростанций и систем хранения энергии (PV + BESS) наиболее высока в южных провинциях Казахстана, что пропорционально снижает $LCOE_{el}$ по сравнению с центральной и северной зонами.

На рисунке 2 также показано, что после 2017 года использование дизельных генераторов нерентабельно, поскольку эксплуатационные расходы в основном состоят из затрат на топливо; техническое обслуживание и замена деталей составляют лишь небольшую долю и мало влияют на годовые затраты.

На рисунке 3 показаны графики зависимости себестоимости ($LCOE_{el}$) от емкости аккумуляторов BESS PV-станции мощностью 30 кВт.

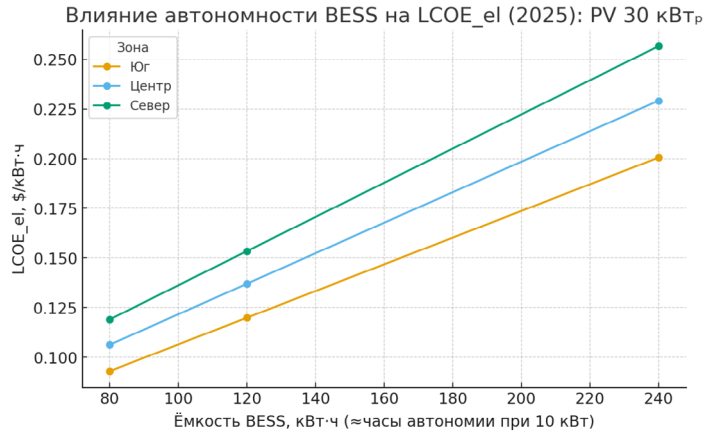


Рисунок 3 – График зависимости приведенной стоимости энергии ($LCOE_{el}$) от емкости BESS, на примере PV-станции мощностью 30 кВт.

Как видно из графика, увеличение периода автономной работы PV+BESS-станции от 80 до 240 часов, приводит к пропорциональному росту стоимости электроэнергии, в 2 с лишним раза.

Информация о финансировании

Работа выполнена при финансовой поддержке грантового проекта: ГФ ИРН № AP26199873: «Разработка энерго- и ресурсосберегающей гибридной технологии транспортировки, хранения и складирования початков кукурузы с одновременной осциллирующей сушкой в контейнерах с использованием гелиовоздушных коллекторов и теплонасосной установки» [20].

Выводы

Снижение цен на фотоэлектрические модули и достижения в технологиях хранения энергии сделали гибридные системы возобновляемой энергии реалистичным вариантом для электроснабжения удаленных объектов в Казахстане. Приоритетной задачей является сбор данных о местных ресурсах солнечной, ветровой и малой гидроэнергетики; эти данные используются для построения региональной технико-экономической модели, управления логистикой и поддержки пилотных испытаний.

В южных регионах в качестве основного генератора может использоваться установка PV+BESS. Пользователям, требующим высокой надежности, по-прежнему необходим дизельный генератор для кратковременных пиковых нагрузок зимой.

В центральной зоне гибридная установка PV+BESS также может выступать в качестве основного источника, несмотря на сравнительно более высокую приведенную стоимость электроэнергии (LCOE), с резервным дизельным генератором, предназначенным для редких зимних отключений.

На севере, где инсоляция ниже, установка PV+BESS стала дешевле дизельного топлива в начале 2020-х годов, поэтому фотоэлектрическая батарея может обеспечивать базовую нагрузку, в то время как дизельный генератор остается лишь резервным.

В целом, пакет PV+BESS должен покрывать большую часть годового спроса на электроэнергию, при этом дизельный генератор будет работать как можно реже и как можно меньше. Поскольку значительная часть общих затрат приходится на приобретение и эксплуатацию системы хранения энергии, оптимизация емкости батарей имеет важное значение для обеспечения 8–12 часов автономной работы в зимнее время. Дальнейшего повышения эффективности и прибыли можно добиться за счет высококачественной установки, которая увеличивает коэффициент производительности фотоэлектрических модулей и замедляет их деградацию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Указ Президента Республики Казахстан от 2 февраля 2023 г. № 121. Об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года. – [Электронный ресурс]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121.

2 Указ Президента Республики Казахстан от 30 мая 2013 г. № 577. О концепции перехода Республики Казахстан к «зеленой экономике». – [Электронный ресурс]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/U1300000577.

3 IRENA. Затраты на производство возобновляемой энергии в 2023 году. Абу-Даби : Международное агентство по возобновляемым источникам энергии, 2024, 96 с. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023.

4 Глобальный солнечный атлас. Казахстан: Данные о солнечных ресурсах. Вашингтон: Группа Всемирного банка, 2024. – [Электронный ресурс]. – URL: https://globalsolaratlas.info/download/kazakhstan.

5 **Андерсон, К. С., Хоббс, В. Б., Холмгрен, В. Ф.** Влияние коэффициента нагрузки инвертора на погрешность оценки энергии. – Голден, Колорадо: Национальная лаборатория возобновляемых источников энергии (NREL), 2022. – 36 с. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/82812.pdf.

6 **Todorov, T., Stoyanov I.** Optimizing the Area of the Photovoltaic System taking into Account Shading and other Operational Conditions. (2024) CIEES 2024 – IEEE International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems, Cited 1 times. – https://doi.org/10.1109/CIEES62939.2024.10811269 – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85216584129&doi=10.1109%2fCIEES62939.2024.10811269&partnerID=40&md5=981c8f055fd9ab5ba9640199f933c494

7 PVsyst. Коэффициент производительности. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.pvsyst.com/help-pvsyst7/performance_ratio.htm.

8 **Deline, C.** PV Lifetime Project - 2021 NREL Annual Report. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5K00-81172.– [Электронный ресурс]. – URL: https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/81172.pdf.

9 **Хассан, К., Альгбури, С., Самин, А. З., Салман, Х. М., Яшчур, М.** Обзор гибридных систем возобновляемой энергии: решения на основе солнечной и ветровой энергии // Обзоры возобновляемой и устойчивой энергетики. – 2023. – Том 186. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259012302300748X.

10 **Назари, М. А., Гасеми, Х., Пурреза, Ф. и др.** Обновленный обзор интеграции солнечных фотоэлектрических систем и тепловых насосов // Обзоры возобновляемой и устойчивой энергетики. – 2023. – Том 167. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082622002496.

11 **Ван, В., Ли, Ю., Чжан, С.** Техникоэкономическая оценка гибридных систем PV–дизель–аккумулятор для птицеферм // Energy Reports. – 2025. – Том 15. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427125000130.

12 **Ахмад, С., Бухари, С. С., Хан, А. А. и др.** Обзор гибридных возобновляемых и устойчивых энергетических систем : расчет размеров, оптимизация и управление // Energies. – 2024. – Том 17, № 23. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/17/23/6027.

13 Партнерство минисетей. Отчет о состоянии мирового рынка минисетей за 2024 год. – Лондон, 2024. – 132 с. – [Электронный ресурс]. – URL: https://minigrids.org/wp-content/uploads/2024/08/SOTM-Report-Launch_vF.pdf.

14 NASEO; NARUC. Микросеть чистой энергии: соображения для государственных энергетических управлений и комиссий по коммунальным услугам. – Вашингтон, округ Колумбия, 2023 г. – 78 с. – [Электронный

ресурс]. – URL: https://www.naseo.org/Data/Sites/1/documents/tk-news/clean-energy-microgrids_interactive.pdf.

15 IEA PVPS. Годовой отчет за 2021 год. – Париж: Международное энергетическое агентство, 2022 г. – 56 с. – [Электронный ресурс]. – URL: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/03/IEA-PVPS_Annual_Report_2021_v1.pdf.

16 **Ибрагим, М. Х., Акбар, М., Шукла Р.** Водородный солнечный насос в ночном орошени: устойчивые альтернативы дизелному топливу с использованием фотоэлектрических систем // Возобновляемая энергия. – 2024. – Том 219. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890424001602.

17 **Намдар, Х., Джалали, А., Мовахед, М. и др.** Фотоэлектрические тепловые системы с солнечными батареями : обзор // Энергетика и здания. – 2025. – Том 317. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778825002464.

18 **Гидрайтите, А., Слапшис, Р., Сабалюнас, Д.** Гибридные возобновляемые энергетические системы — обзор подходов к оптимизации и будущих задач // Прикладные науки. – 2025. – Том 15, № 4. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/15/4/1744.

19 **Halabi, Laith & Mekhilef, Saad & Olatomiwa, Lanre & Hazelton, James.** (2017). Performance analysis of hybrid PV/diesel/battery system using HOMER: A case study Sabah, Malaysia. Energy Conversion and Management. 144. 10.1016/j.enconman.2017.04.070. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/316515713_Performance_analysis_of_hybrid_PVdieselbatt

20 Национальный научный совет по приоритету «Устойчивое развитие агропромышленного комплекса». Протокол заседания № 4 (Астана, 15 июля 2025 г.) / Мин-во науки и высшего образования РК. – 2025. – 9 с.

REFERENCES

1 Ukaz Prezidenta Respubliki Kazahstan ot 2 fevralya 2023 g. № 121. Ob utverzhdenii Strategii dostizheniya uglerodnoj nejtralnosti Respubliki Kazahstan do 2060 goda. [Decree of the President of the Republic of Kazakhstan dated February 2, 2023 No. 121. On approval of the Strategy for achieving carbon neutrality of the Republic of Kazakhstan until 2060]. – [Electronic resource]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121.

2 Ukaz Prezidenta Respubliki Kazahstan ot 30 maya 2013 g. № 577. O koncepcii perehoda Respubliki Kazahstan k «zelenoj ekonomike». [Decree of the President of the Republic of Kazakhstan dated May 30, 2013 No. 577. On the concept of the transition of the Republic of Kazakhstan to a "green economy"]. – [Electronic resource]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/U1300000577.

3 IRENA. Zatraty na proizvodstvo vozobnovlyaemoj energii v 2023 godu. Abu-Dabi : [Renewable Energy Generation Costs in 2023. Abu Dhabi], Mezhdunarodnoe agentstvo po vozobnovlyaemym istochnikam energii, 2024, 96 s. [International Renewable Energy Agency, 2024, 96 p.] – [Electronic resource]. – URL: https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023.3

4 Globalnyj solnechnyj atlas. Kazahstan: Dannye o solnechnyh resursah. Vashington: Gruppa Vsemirnogo banka, 2024. [Global Solar Atlas. Kazakhstan: Solar Resource Data. Washington: World Bank Group, 2024.] – [Electronic resource]. – URL: https://globalsolaratlas.info/download/kazakhstan.

5 **Anderson, K. S., Hobbs, W. B., Holmgren, W. F.** Vliyanie koefficienta nagruzki invertora na pogreshnost ocenki energii. [Effect of Inverter Load Factor on Energy Estimation Error]. – Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2022. – 36 p. – [Electronic resource]. – URL: https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/82812.pdf.

6 **Todorov, T., Stoyanov I.** Optimizing the Area of the Photovoltaic System taking into Account Shading and other Operational Conditions. (2024) CIEES 2024 – IEEE International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems, Cited 1 times. – https://doi.org/10.1109/CIEES62939.2024.10811269 – [Electronic resource]. – URL: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85216584129&doi=10.1109%2fCIEES62939.2024.10811269&partnerID=40&md5=981c8f055fd9ab5ba9640199f933c494 pdf.

7 PVsyst. Koefficient proizvoditelnosti. [Performance Ratio]. – [Electronic resource]. – URL: https://www.pvsyst.com/help-pvsyst7/performance_ratio.htm.

8 **Deline, C.** PV Lifetime Project – 2021 NREL Annual Report. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5K00-81172.– [Electronic resource]. – URL: https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/81172.pdf.

9 **Hassan, K., Alghbouri, S., Samin, A. Z., Salman, H. M., Yashchur, M.** Obzor gibridnyh sistem vozobnovlyaemoj energii : resheniya na osnove solnechnoj i vetrovoj energii // Obzory vozobnovlyaemoj i ustojchivoj energetiki. [Review of Hybrid Renewable Energy Systems: Solar-Wind Solutions // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2023. – Vol. 186]. – [Electronic resource]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259012302300748X.

10 **Nazari, M. A., Ghasemi, H., Pourreza, F. et al.** Obnovlennyj obzor integracii solnechnyh fotoelektricheskih sistem i teplovyh nasosov // Obzory vozobnovlyaemoj i ustojchivoj energetiki. – 2023. – Tom 167. [An updated review

of the integration of solar photovoltaic systems and heat pumps // Reviews of Renewable and Sustainable Energy. – 2023. – Vol. 167]. – [Electronic resource]. - URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082622002496.

11 **Wang, W., Li, Y., Zhang, S.** Tehnikoekonomicheskaya ocenka gibridnyh sistem PV–dizel–akkumulyator dlya pticeferm [Techno-economic assessment of hybrid PV–diesel–battery systems for poultry farms]. // Energy Reports. – 2025. – Vol. 15. – [Electronic resource]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427125000130.

12 **Ahmad, S., Bukhari, S. S., Khan, A. A., et al.** Obzor gibridnyh vozobnovlyaemyh i ustojchivyh energeticheskih sistem: raschet razmerov, optimizaciya i upravlenie [A review of hybrid renewable and sustainable energy systems: sizing, optimization, and control]. // Energies. – 2024. – Vol. 17, No. 23. – [Electronic resource]. – URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/17/23/6027.

13 Partnerstvo minisetej. Otchet o sostoyanii mirovogo rynka minisetej za 2024 god. – London, 2024. – 132 s. [Mini-grid Partnership. Global Mini-Grid Market Report 2024. London, 2024. 132 p. Available at] – [Electronic resource] – https://minigrids.org/wp-content/uploads/2024/08/SOTM-Report-Launch_vF.pdf.

14 NASEO; NARUC. Mikroset chistoj energii: soobrazheniya dlya gosudarstvennyh energeticheskih upravlenij i komissij po kommunalnym uslugam. – Vashington, okrug Kolumbiya, 2023 g. – 78 s. [Clean Energy Microgrids : Considerations for State Energy Offices and Public Service Commissions. Washington, DC, 2023, 78 p. Available at] – [Electronic resource] – https://www.naseo.org/Data/Sites/1/documents/tk-news/clean-energy-microgrids_interactive.pdf.

15 IEA PVPS. Godovoj otchet za 2021 god. – Parizh: Mezhdunarodnoe energeticheskoe agentstvo, 2022 g. – 56 s. [Annual Report 2021. Paris: International Energy Agency, 2022, 56 p]. – [Electronic resource] – Available at: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/03/IEA-PVPS_Annual_Report_2021_v1.pdf.

16 **Ibrahim, M. H., Akbar, M., Shukla, R.** Vodorodnyj solnechnyj nasos v nochnom orosheni: ustojchivye alternativy dizelnomu toplivu s ispolzovaniem fotoelektricheskih sistem [Hydrogen solar pump in night irrigation: sustainable alternatives to diesel fuel using photovoltaic systems]. // Renewable Energy. – 2024. – Vol. 219. – [Electronic resource]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890424001602.

17 **Namdar, H., Jalali, A., Movahed, M., et al.** Fotoelektricheskie teplovye sistemy s solnechnymi batareyami: obzor [Photovoltaic Thermal Systems with Solar Panels]: A Review // Energy and Buildings. – 2025. – Vol. 317. – [Electronic resource]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778825002464.

18 Gidraityte, A., Slapšys, R., Sabalunas, D. Gibridnye vozobnovlyaemye energeticheskie sistemy – obzor podhodov k optimizacii i budushih zadach // Prikladnye nauki. [Hybrid Renewable Energy Systems – A Review of Optimization Approaches and Future Challenges] // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15, No. 4. – [Electronic resource]. – URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/15/4/1744.

19 **Halabi, L. M., Mekhilef, S., Olatomiwa, L.** Analiz proizvoditelnosti gibridnoj sistemy PV–dizel–akkumulyator s ispolzovaniem HOMER : tematicheskoe issledovanie, Sabah, Malajziya [Performance Analysis of PV–Diesel–Battery Hybrid System Using HOMER].: A Case Study, Sabah, Malaysia // Energy Conversion and Management. – 2017. – Vol. 144. – [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/316515713_Performance_analysis_of_hybrid_PVdieselbatt

20 Nacional`ny`j nauchny`j sovet po prioritetu «Ustojchivoe razvitie agropromy`shlennogo kompleksa». Protokol zasedaniya № 4 (Astana, 15 iyulya 2025 g.) [National Scientific Council on the priority “Sustainable Development of the Agro-Industrial Complex”. Minutes of Meeting No. 4 (Astana, July 15, 2025)] / Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan. – 2025. – 9 p.

Поступило в редакцию 29.04.26.
Поступило с исправлениями 20.05.26.
Принято в печать 03.09.26.

Д. Р. Омар[1], Р. А. Омаров[2], Е. С. Умбетов[3],
*С. Т. Демесова[4], *Н. И. Молдыбаева[5]*
[1,2]Агроинженерлік ғылыми-өндірістік орталығы, зертхана меңгерушісі:
Энергия үнемдеу және жасыл энергия,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[1,2]Ғ.Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[3]Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[4,5]Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
29.04.26 ж. баспаға түсті.
20.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
03.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

КӨМІРТЕКТІ БЕЙТАРАПТЫЛЫҚ ЖАҒДАЙЫНДАҒЫ АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫ ПРОЦЕСТЕРІН ЭНЕРГИЯМЕН ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУГЕ АРНАЛҒАН АВТОНОМДЫҚ КҮН ЖҮЙЕЛЕРІН БАҒАЛАУ

Азық-түлікке деген сұраныс ауыл шаруашылығында экологиялық таза энергияға деген сұранысты жылдам арттыруда. Сондықтан басқа аспектілермен бірге жаңа энергия көздерін іздеу ауылшаруашылық инженерия ғылымының орталығында тұр. Қазақстанның континенттік климатында аккумуляторды сақтау жүйесі (PV+BESS) бар фотоэлектрлік электр станцияларының болашағы зор. Дегенмен, олардың дизельдік генерациямен салыстырғанда бәсекеге қабілеттілігі сандық бағалауды қажет етеді.

Әдістері. Қазақстан бойынша әдебиеттерге шолу және ресурс деректері негізінде қысқы шығындар мен автономды жұмысты ескере отырып, PVOUT ≈ 1200–1600 кВт/сағ және өнімділік коэффициенті PR ≈ 0,75–0,85 нақты өндіру диапазоны қабылданды. Есептеулер үш климаттық аймақта (Оңтүстік, Орталық және Солтүстік) PV+BESS модульдері мен дизельдік генератор жинақтары (DGS) үшін $LCOE_{el}$ индикаторын пайдалану арқылы техникалық-экономикалық бағалаумен қатар, әдеттегі қашықтағы тұтынушылар үшін қажетті орнатылған PV панелінің сыйымдылығы мен BESS сыйымдылығының көрсеткіштері жасалды. Талдау PV панелі мен батарея құнының динамикасын, сондай-ақ автономияны (BESS сыйымдылығын) 80-ден 240 сағатқа дейін арттыру әсерін ескере отырып, 2010–2025 жылдар аралығын қамтиды.

Нәтижелер. 2010–2025 жылдарға арналған монокристалды PV панельдерінің құны шамамен 10-15 есеге (~0,12-0,13 $/Вт дейін) төмендегені көрсетілген, нәтижесінде PV+BESS $LCOE_{el}$ деңгейі оңтүстікте ~0,09 $/кВт/сағ, орталықта ~0,11 $, $/кВт/сағ, ал солтүстікте $2 және 2 кВт/сағ төмендеді. дизельдік генератордың электр энергиясының құны іс жүзінде өзгеріссіз қалды (~0,20-0,21 $/кВтсағ). PV+BESS дизельді генерациядан паритет пен кейінгі артықшылыққа ертерек Оңтүстікте (≈2015-2016), одан кейін Орталық және Солтүстік аймақтарда (≈2016-2018) қол жеткізілді. $LCOE_{el}$ маңызды үлесі BESS-ке тиесілі екені анықталды, ал қажетті автономияны арттыру жүйенің құнын айтарлықтай арттырады.

Талқылау және қорытындылар. Алынған нәтижелер көрсеткендей, PV+BESS модульдері 2025 жылға қарай Қазақстанның шалғай учаскелерінде автономды электрмен жабдықтау үшін экономикалық тиімді базалық қуат көзі болады, ал дизельдік генераторлар резервтік/шың көз ретінде қызмет етуді жалғастырады. Оңтайландырудың негізгі бағыттарына сәйкес BESS қуатын таңдау (қыс мезгілінде шамамен 8–12 сағат автономияны қамтамасыз ету), жоғары сапалы орнату және пайдалану арқылы PR-ды жақсарту және электр энергиясын, жылуды және салқындатуды біріктіріп өндіру үшін PV+BESS жылу сорғыларымен (PV+BESS+HP/PVT) біріктіру кіреді. (BESS); PV–BESS–DGU гибридті кешендері; қашықтағы объектілерді дербес энергиямен жабдықтау; электр энергиясының құны (LCOE); техникалық-экономикалық талдау (NPV, IRR); PV өнімділік коэффициенті (PR); Қазақстанның климаттық жағдайлары.

Кілтті сөздер: фотоэлектрлік жүйелер (PV); батарея энергиясын сақтау жүйелері (BESS); гибридті PV–BESS–дизельдік генераторлық қондырғылар (DGS) кешендері; ауыл шаруашылығы объектілерін автономды электрмен жабдықтау; электр энергиясының теңестірілген құны (LCOE); техникалық-экономикалық талдау (NPV, IRR); PV жүйелерінің өнімділік коэффициенті (PR); Қазақстанның климаттық жағдайы.

*D. Omar[1], R. Omarov[2], E. Umbetov[3], S. Demessova[4], *N. Moldybayeva[5]*
[1]Agroengineering Scientific and Production Center,
Laboratory Head: Energy Saving and Green Energy,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2] G. Daukeyev Almaty University of Power
Engineering and Telecommunications,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[3]Kazakh National Women's Teacher Training University,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[4,5]Kazakh National Agrarian Research University,
Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 29.04.26.
Received in revised form 20.05.26.
Accepted for publication 03.09.26

EVALUATION OF AUTONOMOUS SOLAR SYSTEMS FOR POWER SUPPLY OF AGRICULTURAL PROCESSES IN CONDITIONS OF CARBON NEUTRALITY

The demand for food is dynamically increasing the demand for environmentally and economically acceptable energy in agriculture. Therefore, the search for new energy sources is at the center of agricultural engineering science, along with other aspects. In the continental climate of Kazakhstan, photovoltaic stations with storage systems (PV+BESS) are promising. However, their competitiveness compared to diesel generation requires quantitative assessment.

Methods. Based on a review of literature and resource data for Kazakhstan, the specific output range PVOUT ≈ 1200–1600 kWh/kW·year and performance coefficient PR ≈ 0.75–0.85 were adopted, taking into account winter losses and autonomous mode. Calculations of the required installed capacity of PV panels and BESS capacity for typical remote consumers, as well as a feasibility study based on the $LCOE_{el}$ indicator for PV+BESS modules and diesel generator sets (DGS) in three climate zones (South, Center, North) have been performed. The analysis covers the period from 2010 to 2025.

Results. It is shown that the cost of monocrystalline PV panels in 2010-2025 decreased by about 10-15 times (to ~ 0.12-0.13 $/Watt), which led to a decrease in $LCOE_{el}$ PV+BESS to ~ 0.09 $/kWh in the South, ~ 0.11 $/kWh in the Center and ~ 0.12 $/kWh in the North at an almost constant cost of DSU electricity (~ 0.20–0.21 $/kWh). Parity and subsequent superiority of PV+BESS over diesel generation were achieved earlier in the South (≈ 2015–2016), then in the Central and Northern regions (≈ 2016–2018). It has been established that a significant share of $LCOE_{el}$ is accounted for by BESS, and an increase in the required autonomy significantly increases the cost of the system.

Discussion and conclusions. The results obtained show that PV+BESS modules by 2025 become an economically preferable base source for autonomous power supply of remote facilities in Kazakhstan, while maintaining the DGS as a backup/peak source. The key areas of optimization are the selection of a rational BESS capacity (providing autonomy of the order of Increasing the required autonomy significantly increases the cost of the system.

Keywords: photovoltaic systems (PV); energy storage systems (BESS); hybrid PV–BESS–DGU complexes; autonomous power supply for agricultural facilities; electricity cost (LCOE); technical and economic analysis (NPV, IRR); photovoltaic system performance coefficient (PR); climatic conditions in Kazakhstan.

МРНТИ 50.09.45

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/475-498

***И. М. Орман[1], К. Т. Искаков[2]**

[1]Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, Республика Казахстан, г. Петропавловск;

[2]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана.

[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8072-4996

[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3872-4026

*e-mail: Indira.malikovna@mail.ru

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РАДАРОГРАММ ДАННЫХ ГЕОРАДАРА МЕТОДОМ ЗОНДИРОВАНИЯ

В данной статье на примере экспериментальных исследований, выполненных с использованием георадара «Лоза-В», изложена методика первичной обработки и интерпретации экспериментальных георадарных данных. В качестве полигона исследований выбран участок песчаного карьера, представляющий собой однородную среду, сложенную речным песком. Указанный карьер расположен вблизи города Астаны и характеризуется относительно простыми геологическими условиями, что позволяет использовать его в качестве тестовой площадки для отработки и верификации методов георадиолокационного зондирования. В ходе полевых экспериментов на исследуемом участке были изучены различные объекты естественного и искусственного происхождения, залегающие на известных глубинах. Для проведения измерений применён метод зондирования, при котором антенна и источник электромагнитного сигнала раздвигаются на равные расстояния относительно центра предполагаемого подповерхностного объекта. Такой подход позволяет повысить достоверность определения скоростных характеристик среды и мощностей слоёв. В работе выполнена интерпретация серии радарограмм, полученных в результате экспериментальных исследований с георадаром, включая выделение отражённых волн, георадарных комплексов и локальных аномалий. Полученные результаты используются для решения коэффициентных обратных задач, в частности для определения геофизических свойств подстилающего слоя, таких

как диэлектрическая проницаемость и электропроводность. Представленная методика может быть применена при инженерно-геологических изысканиях, диагностике состояния грунтов и прогнозировании дефектов в подповерхностной среде.

Ключевые слова: георадиолокация, георадарные комплексы, метод зондирования, радарограмма, диэлектрическая проницаемость, геологический разрез, влажность пород.

Введение

Такого сорта задачи возникают при прогнозе состояния дорожного покрытия, так как из-за природных условий может происходить деформирование дорожного покрытия (вздутие, обвал верхнего слоя), как правило из-за техногенных явлений, а именно за нарушения целостности грунта, связанной повышением ее влажности.

Если влажность грунта увеличилась вследствие присутствия грунтовых вод, то относительная диэлектрическая проницаемость грунта тоже увеличится. В связи с этим нами проведены дополнительно экспериментальные исследования по определению корреляционной зависимости между влажностью грунта и ее диэлектрической проницаемости. Эксперименты были проведены на базе Восточно-Казахстанского технического университета им Д. Серикбаева. Имея значения диэлектрической проницаемости по слоям дорожной одежды на основе методики первичной обработки георадарных данных и используя экспериментально установленную зависимость диэлектрической проницаемости, можно спрогнозировать состояние влажности подстилающей среды.

В рамках исследования была проанализирована методика интерпретации данных георадиолокации (GPR), предложенная А.В. Старовойтовым [1]. Выделяются четыре этапа:

Идентификация волн-помех, в котором исследуются распознавание и исключение ложных отражений; Выделение георадарных комплексов, а именно участок разреза, соответствующий определённой геологической толще; Интерпретация георадарных фаций- структурные единицы внутри комплекса, отражающие специфические условия формирования среды; Построение глубинного разреза, а именно переход от временного разреза по данным георадара к глубинному, то есть определения геоэлектрического разреза по слоям дорожной одежды. Преобразование временных данных в глубинные осуществляется с учётом скоростей радиоволн в различных средах. Методика Старовойтова – комплексный подход к интерпретации

GPR-данных, позволяющий пошагово перейти от «сырых» радарограмм к инженерной модели среды.

Обработка георадарных данных выполнялась в программном обеспечении «Крот-NS». Первичная обработка включала подавление низкочастотных и высокочастотных шумов, нормализацию амплитуды сигнала, определение диэлектрической проницаемости среды по гиперболическим отражениям, выделение отражающих горизонтов и локальных аномалий. На заключительном этапе выполнялся переход от временного разреза к глубинному с построением геоэлектрического разреза исследуемой среды.

Научная новизна исследования заключается в адаптации методики интерпретации георадарных данных А. В. Старовойтова к оценке состояния неоднородных грунтов и дорожных конструкций с использованием метода зондирования. Предложен комплексный подход, объединяющий обработку радарограмм, определение диэлектрической проницаемости среды и экспериментально установленную зависимость между диэлектрической проницаемостью и влажностью грунта. Это позволяет повысить достоверность интерпретации георадарных данных при прогнозировании дефектов дорожных покрытий.

Материалы и методы

Георадиолокация, также как и сейсморазведка, является волновым методом, поэтому основные методические приемы, которые используются при геологической интерпретации радарограмм [2]. В сейсморазведке эта методика, получила название сейсмической стратиграфии [3]. Эта методика основана на анализе динамических и кинематических особенностей всей волновой картины. При интерпретации георадиолокационных данных выделим два основных направления. Первое связано с поиском разнообразных объектов естественного, так и искусственного происхождения. К последним относятся: трубопроводы различного назначения; кабели; коллекторы; карстовые пустоты; археологические объекты и многое другое. Второе направление связано с детальным изучением разреза, о котором в априори ничего не известно. Анализ волновой картины начинается с выделения осей синфазности отраженных волн, которые являются волнами-помехами. После обработки и выделения волн-помех радарограммы готовы к интерпретации. Целью интерпретации георадиолокационных данных, является переход от временного разреза к глубинному. Детальное изучение разреза основано на методических приемах, как и в сейсморазведке [4]. Эта методика разделения разреза применяется и при анализе георадиолокационных данных [5; 6]. При интерпретации сейсмических данных эта методика получило название

сейсмофациального анализа [4]. Вопрос об определении фации достаточно сложный и неоднозначный [7; 8].

Практические и теоретические методы подповерхностной радиолокации описаны в работах авторов дальнего и ближнего зарубежья [9; 10; 11; 12; 13; 14; 15].

Экспериментальные исследования были проведены на песчаном карьере вблизи города Астаны по направлению Кургальджинской трассы. Для проведения эксперимента был использован георадар серии «Лоза-В», имеющий диапазон рабочих частот 50–300 МГц, и антенны с разверткой: 0,5 м; 1 м; 1,5 м и 3м. Для исследования выбран метод зондирования, так как в этом случае можно определить мощности слоев неоднородной среды. Данный георадар имеет лицензионное программное обеспечение «Крот-NS» [16]. Первичная обработка сырых георадарных данных выполнялась по методике профессора А. В. Старовойтова. [1]. Предложена методика применения программного обеспечения при интерпретации георадарных данных и соответствующих необходимых функций программного обеспечения, что является трудоемкой задачей и требует специализированного подхода и навыков геофизических обработок реальных данных. Проведены экспериментальные исследования на песчаном карьере с использованием георадара «Лоза-В». Использован метод зондирования, в котором антенна и источник раздвигаются на равные расстояния от центра лежачего предполагаемого объекта на карьере. Обработаны по предложенной выше методике два объекта: железная канистра и купол торфа, лежащие в песке на известной глубине. Указанные объекты использовались для экспериментальной проверки предложенной методики. Процесс обработки включал следующие этапы. Ниже приведены основные этапы обработки экспериментальных данных, обеспечивающие переход от временного разреза к геоэлектрическому.

Визуализация радарограмм состоит из следующих этапов:

«З9-зондирование 50 см антенной шаг 20 см» (рисунок 1).

Первичная обработка георадарных данных включала загрузку радарограммы, настройку параметров отображения, последовательное применение низко- и высокочастотной фильтрации, определение диэлектрической проницаемости по гиперболическим отражениям, выделение границ слоев и построение геоэлектрического разреза.

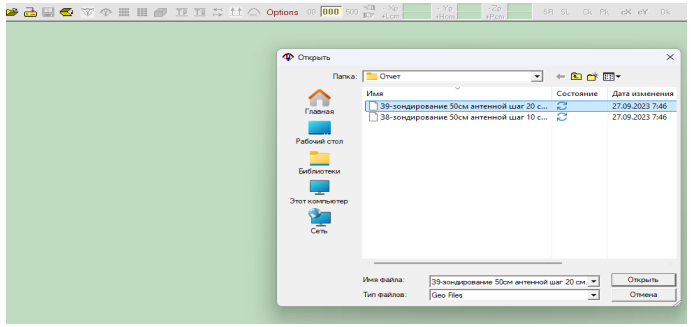


Рисунок 1 – На первом этапе выполнялась загрузка экспериментальной радарограммы

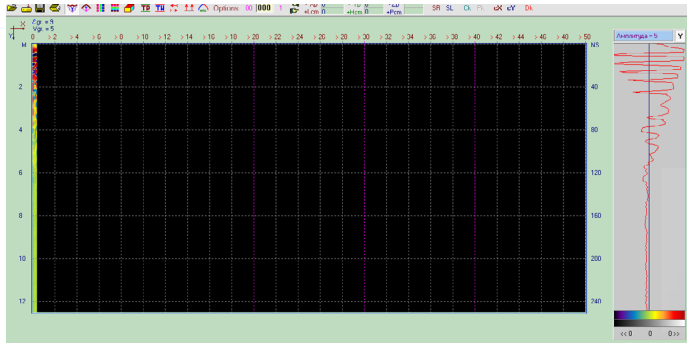


Рисунок 2 – Радарограмма по горизонтали

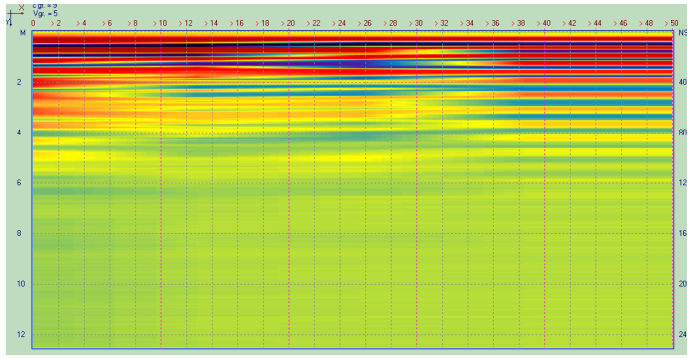


Рисунок 3 – Настройка профиля

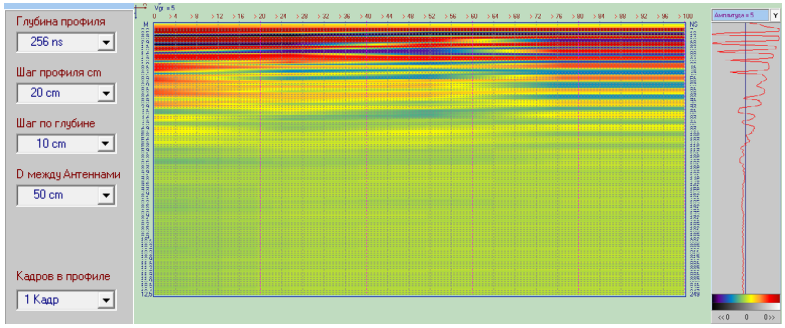


Рисунок 4 – Настройка фильтра

Фильтр 1 НЧ2 – низкочастотный реверсивный, хорошо сглаживает шум, сохраняя границы (рисунок 5). L=8 Глубина по X (L): 5-10 (сглаживание по горизонтали). H=15 Глубина по Y (H): 10-20 (сглаживание по глубине). X=1 Косая фильтрация (X): 0 или малое значение.

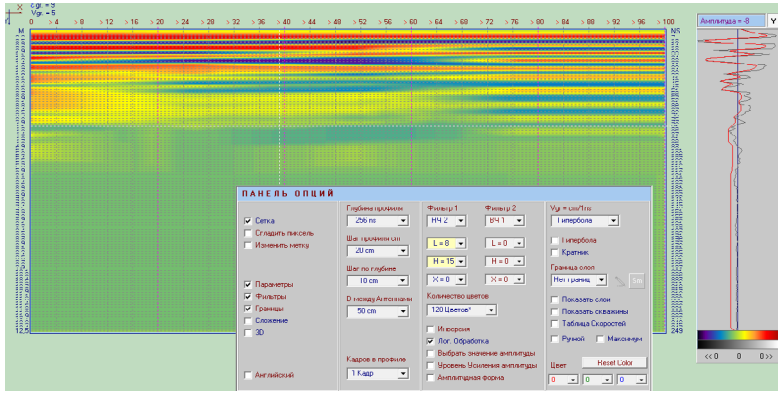


Рисунок 5 – Фильтр 1 НЧ2

Фильтр 2: Тип ВЧ1 или ВЧ2 (высокочастотный - подчёркивает детали, убирает низкочастотный тренд). При высоком уровне шумов рекомендуется использовать параметры, аналогичные настройкам фильтра НЧ2.

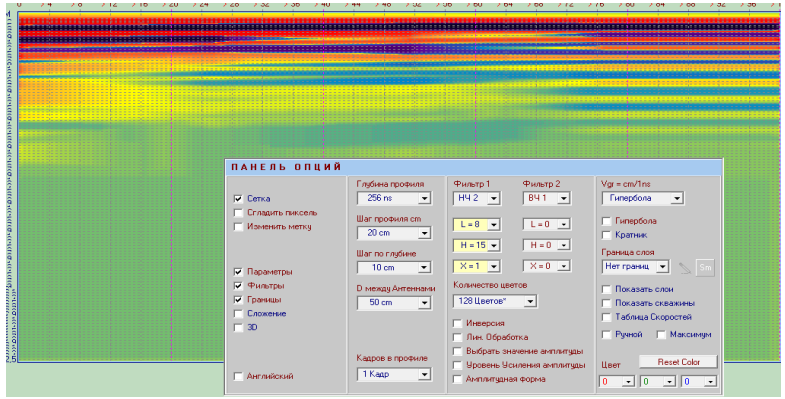


Рисунок 6 – ВЧ-фильтр

ВЧ-фильтр подчёркивает резкие изменения (трубы, камни, пустоты, гиперболы) – отлично для поиска объектов (рисунок 6).

Лучший набор фильтрации, видимость слоев хорошая, шумы минимизированы

Определение диэлектрической проницаемости, при помощи гиперболы (рисунок 7).

Рисунок 7– Гепербола

Была выбрана гипербола, ставим на радиограмме точку, где есть выраженная гипербола.

Второй способ. Находим на радарограмме горизонтальную границу. Измеряем время t от нуля (прямой сигнал) до этой границы (в нс, по вертикальной оси). Подбирем V_{gr} в блоке V_{gr} так, чтобы эта граница оказалась ровно на глубине. Если $t \approx$ 15-20 нс – $V_{gr} \approx$ 5-6.7 см/нс (влажный торф, ε_r 20-30). Если $t \approx$ 25-28 нс – $V_{gr} \approx$ 3.6-4 см/нс (очень влажный, ε_r 60-70). В верхнем левом углу отображается значение диэлектрической проницаемости (рисунок 8).

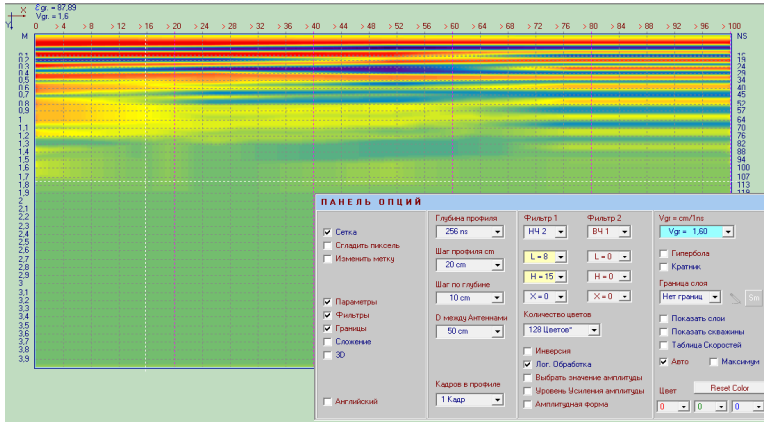


Рисунок 8 – Значение диэлектрической проницаемости

Разметка слоев (рисунок 9)

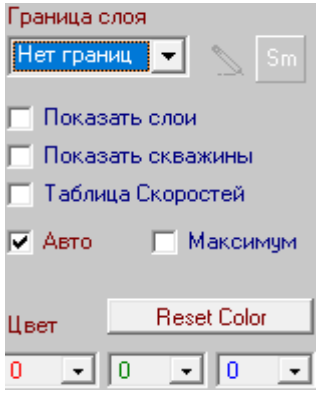


Рисунок 9 – Граница слоя

Из выпадающего списка слой, устанавливаем автоматическую разметку и функцию притяжения «Максимум/Минимум» (рисунок 10).

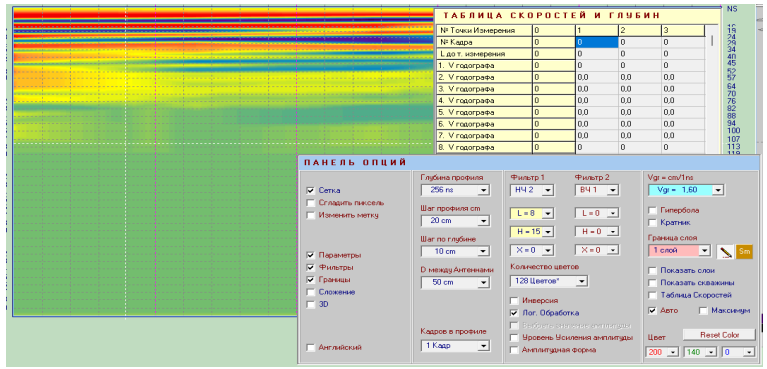


Рисунок 10 – Панель опции

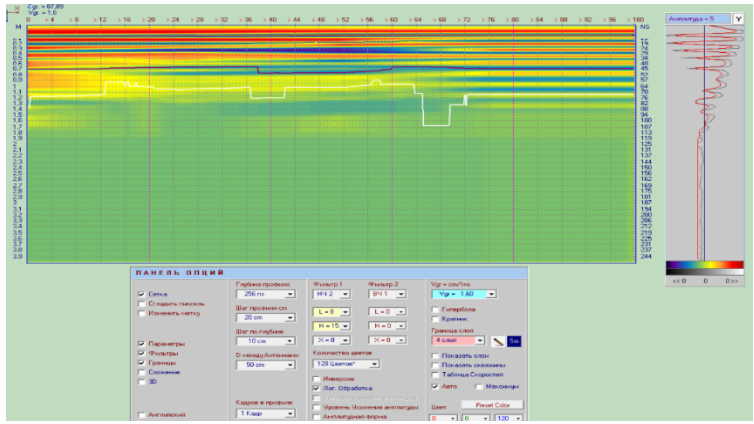


Рисунок 11 – Настройка панель опции

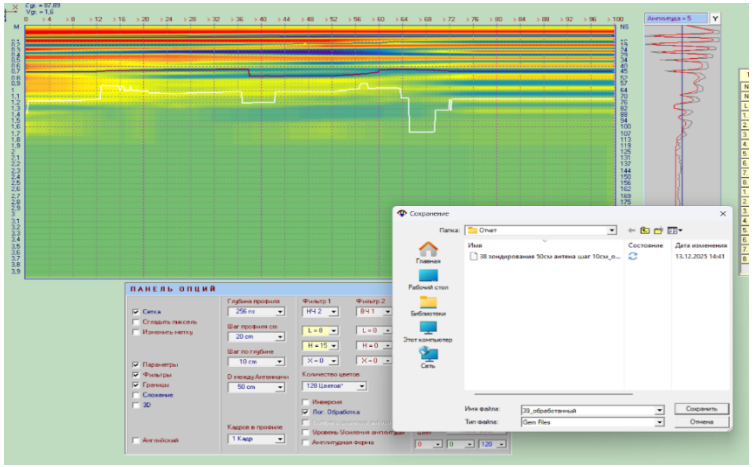


Рисунок 12 – Сохранение панели опции

Аномалия между 10 и 22. Применяем высокочастотную фильтрацию, пробуем убрать отраженные волны, и применяем логарифмическую функцию для нормализации объекта (рисунок 13).

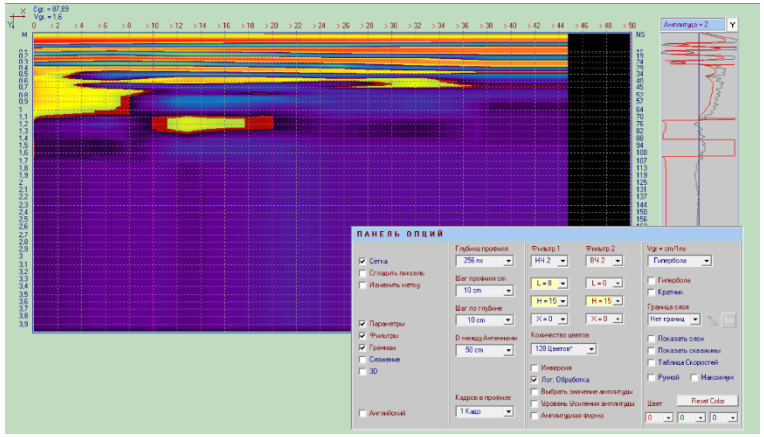


Рисунок 13 – Настройка логарифмической функции

В диапазоне 12–18 условных единиц наблюдается локальная аномалия, предположительно соответствующая железной канистре.

Таким образом, на радарограмме виден локальный объект, а именно железная канистра. На рисунке 14 представлено расположение объекта железной канистры на глубине, порядка 1 метра. Следующим объектом исследования был купол торфа (рисунок 15).

Рисунок 14 – Железная канистра в однородной среде

Рисунок 15 – Купол торфа

По результатам обработки установлено, что снижение степени низкочастотной фильтрации в сочетании с фильтрацией отраженных высокочастотных компонентов позволяет более четко выделить аномалию, соответствующую куполу торфа. Степень низкочастотной фильтрации была уменьшена, при этом дополнительно применялась фильтрация отражённых высокочастотных компонентов по отраженным высоким. Полученные результаты позволяют предположить, что торф характеризуется повышенным поглощением электромагнитного сигнала (рисунок 17).

Аномалия похожая на купол торфа видна на диапазоне 22-30 (рисунок 16).

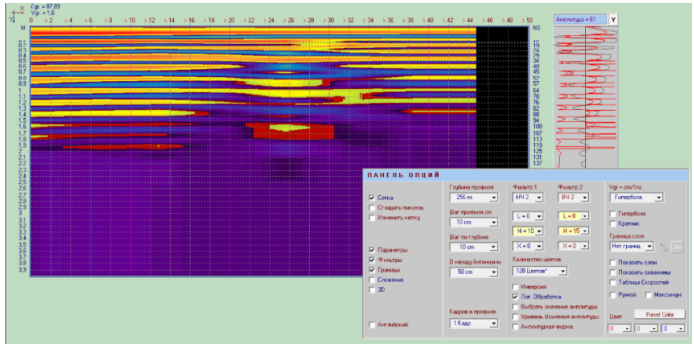


Рисунок 16 – Результат исследования

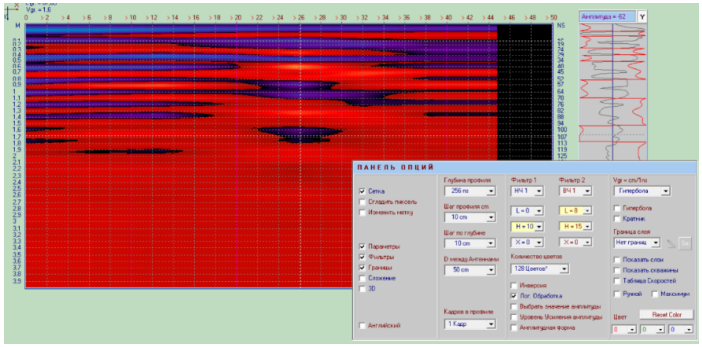


Рисунок 17 – Настройка фильтрации

«На первом этапе выполнялась загрузка экспериментальной радарограммы. Далее проводилось масштабирование изображения, после чего осуществлялась последовательная фильтрация данных с применением низкочастотного и высокочастотного фильтров. Затем определялась диэлектрическая проницаемость среды по гиперболическим отражениям и выполнялось построение геоэлектрического разреза.»

При обработке было выявлено что при нахождении объекта с высокой диэлектрической проницаемостью объект больше поглощает и нужно фильтровать высокие частоты, а низкие оставлять. Этот факт обусловлен тем, что диэлектрическая проницаемость торфа составляет порядка – 50–80 единиц.

3. Определение зависимости диэлектрической проницаемости от влажности

В данном подразделе определена функциональная зависимость между диэлектрической проницаемостью геофизических свойств неоднородной среды и влажностью этих слоев. С этой целью проведен эксперимент следующего содержания. В заполненную колбу слоями из основных компонент неоднородной среды: фрагменты асфальтового покрытия; щебень различных фракций; балласт и подстилающий слой-грунт, внизу колбы нагнеталась водная струя воды. Затем с помощью влагомера МГ4 определялась влажность состояний слоев неоднородной среды. Подача воды в колбу фиксировалась с помощью счетчика расходов воды. Была проведена серия измерений, на основе которой экспериментально установлена функциональная зависимость. Эксперименты были проведены с целью определения значения влажности по слоям, при которых происходит расслоение слоев неоднородной среды. В дальнейшем, решая обратную задачу тем или иным способом, определив геоэлектрический разрез, учитывая

связь между этими данными и степени влажности можно прогнозировать состояние неоднородности на наличие дефектов.

Результаты и обсуждение

Для определения зависимости диэлектрических свойств различных слоев дорожной одежды от влажности были проведены экспериментальные исследования в лабораторных условиях на базе Восточно-Казахстанского университета имени Д. Серикбаева. Неоднородная среда состоит из следующих слоев: мелкозернистый асфальт; крупнозернистый асфальт; железобетонная смесь; щебенка фракции 0.4; щебенка фракции 0.8; подстилающий слой -грунт (суглинка). Был создан макет дорожной одежды, с этой целью была взята пластмассовая колба цилиндрической формы с высотой 240 см и диаметром у основания 18 см. Равномерно были помещены в эту колбу последовательно: четвертый слой - грунт, затем слой балласта ; затем слои щебенки и наконец в верхней части колбы разместили слой асфальта мелкозернистого и крупнозернистого.

Между влажностью грунта и его диэлектрической проницаемостью существует прямая и сильная зависимость: с увеличением содержания воды диэлектрическая проницаемость грунта значительно возрастает. Это объясняется огромной разницей в диэлектрических свойствах компонентов почвы. Например: Чистая вода имеет очень высокую относительную диэлектрическую проницаемость (около 80 при комнатной температуре); Сухой грунт (минеральные частицы и воздух) имеет низкую проницаемость (обычно в диапазоне от 3 до 6, а у воздуха – около 1). Когда в поры грунта добавляется вода, она замещает воздух, и общая диэлектрическая проницаемость смеси резко увеличивается из-за высокого значения этого параметра у воды.

Ключевые аспекты взаимосвязи: Линейность на определенных диапазонах: В определенных диапазонах влажности и частот электромагнитного поля наблюдается почти линейная зависимость диэлектрической проницаемости от содержания воды. Состав и структура грунта: на эту зависимость также влияют тип почвы (например, содержание глины или гумуса), ее плотность, температура и частота электромагнитного поля.

Согласно эмпирическим исследованиям, проведённым лабораторных условиях, имеющихся данных в открытой печати, приведён ряд таблиц о диэлектрической проницаемости и соответственно влажности для ряда интересующих нас материалов (таблица 1).

Таблица 1 – Диэлектрическая проницаемость и скорость [7]

Материал	ϵ	υ υ (см/нс)
Воздух	1	30
Снег	1-2	30-21
Асфальт	3-5	17-13
Лед	4	15
Бетон	4-11	15-9
Породы		
Гранит(сухой)	4-7	15-11
Песчаник(сухой)	6	12
Сланцы	5-15	13-7
Известняки(сухие)	4-8	15-10
Базальты(сухие)	8-9	10
Почвы и отложения	4-30	15-5
Нефть	2,5	19
Вода (пресная и соленая)	81	3,3
Песок плотный		
Сухой	2,93	17
1,5 % воды	5	13
3,0 % воды	11	9
4,5 % воды	39,1	5
Почвы		
7,78 % воды	3,95	15
32,1 % воды	7,93	10,7
36,8 % воды	21,9	6,4
Суглинок сухой	2,44	19,2

Таблица 2 – Электрические свойства некоторых почв, грунтов и пород в диапазоне радиозондирования по данным лабораторных измерений [17]

Материал		Проводимость, См
Сухая песчаная почва	3	$1,5*10^{-4}$
Сухой песчаный и глинистый грунт	3-4	-
Влажная песчаная почва	25	$7*10^{-3}$
Влажный песчаный и глинистый грунт (весовая влажность 4-15 %)	4-15	-
Глинистая почва сухая/влажная	3/15	$2,5*10^{-1}/5*10^{-1}$
Гранит сухой/влажный	5/7	$10^{-5}/10^{-3}$
Базальт влажный	8	10^{-2}

Глинистый сланец влажный	7	10^{-1}
Песчаник влажный	6	$4*10^{-2}$
Известняк влажный	8	$2,5*10^{-2}$

На рисунках 18-21, представлены колбы помещенных в ней образцов состава неоднородной среды.

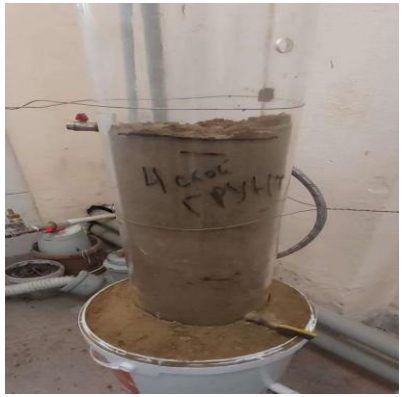


Рисунок 18 – Модель подстилающего слоя: сухой песчаный,глинистый грунт

Рисунок 19 – Модель слоев дорожной одежды: балласт, щебень различной фракции

Рисунок 20 – Модель верхнего слоя дорожной одежды: образцы асфальтного покрытия

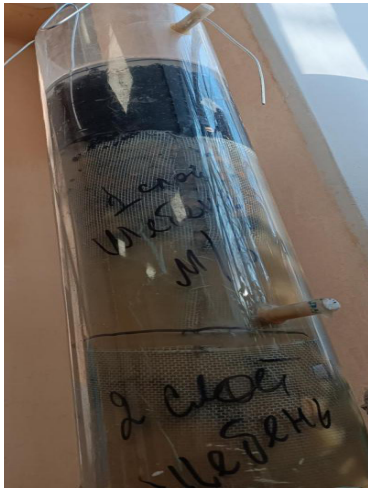


Рисунок 21 – Подготовленная колба и шланг
для нагнетания воды

2. Залив воды в колбу

Для исследования зависимости диэлектрической проницаемости от влажности слоев дорожной одежды был проведен эксперимент. В модель дорожной конструкции, представленной на рисунках 18–21, через нижнюю часть колбы осуществлялась контролируемая подача воды. Расход воды контролировался с помощью счетчика. Цель эксперимента заключалась в установлении калибровочной зависимости между влажностью материала и его диэлектрической проницаемостью, необходимой для последующей интерпретации георадарных данных и прогнозирования процессов расслоения дорожной одежды. Причиной этого могут служить как недостаточное качество строительства дорожной конструкции, так и повышение влажности грунтов основания. Поэтому важно определить связь, то есть построить калибровочную функцию зависимости диэлектрической проницаемости и влажности. Таким образом если определить геоэлектрический разрез с помощью георадарных комплексов на основе инженерно-технических методов либо с помощью математического моделирования и имея функцию калибровки можно прогнозировать процесс расслоения пластов дорожной одежды. И задачей экспериментов также состоит в определении пиковой точки расслоения. Экспериментальные исследования были выполнены авторами статьи. (рисунок 22), ниже приведен процесс экспериментальных исследований. С помощью

влагомера указанной на рисунке 23, были проведены измерения влажностей. Результаты экспериментальных исследований до забора воды и после указаны на рисунках 24-25, в которых отмечены степень влажности слоев грунта до забора воды и после. На рисунках 26-27, согласно выше указанных таблиц указаны 1-3 отмечены значения диэлектрической проницаемости по слоям, причем до забора воды и после.

Рисунок 22 – Экспериментатор

Рисунок 23 – Влагомер

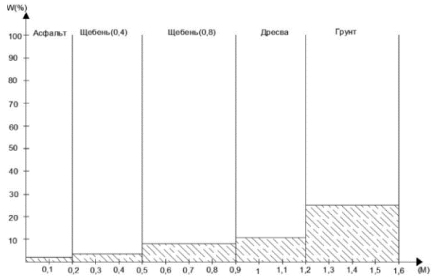


Рисунок 24 – Степень влажности
неоднородной среды
(до забора воды)

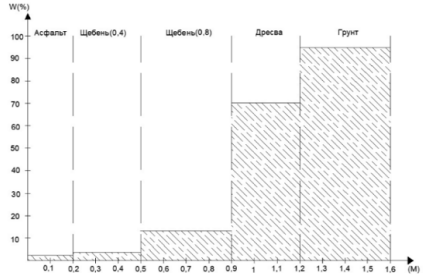


Рисунок 25 – Степень влажности
неоднородной среды
(до забора воды)

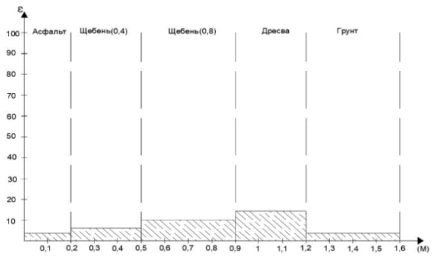


Рисунок 26 – Таблица диэлектрической проницаемости неоднородной среды

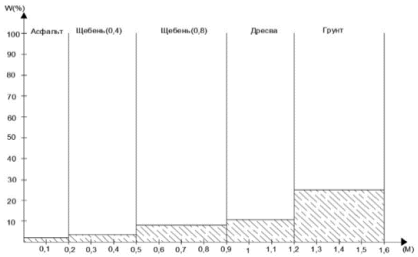


Рис 27 – Таблица ε диэлектрической проницаемости неоднородной среды (влажная)

На рисунке 28 представлена зависимость указана связь между влажностью и диэлектрической проницаемостью по слоям неоднородной среды.

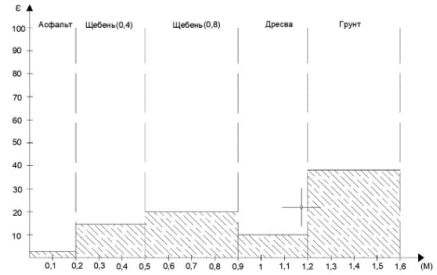


Рисунок 28 – Экспериментально установленная зависимость

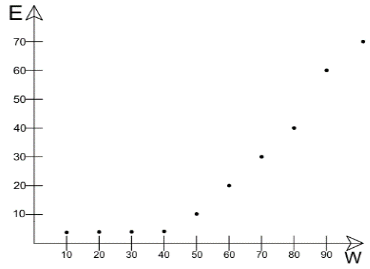


Рисунок 29 – Результат диэлектрической проницаемости и влажности

Таблица 3 – Количественные результаты экспериментальных исследований

Объект	Глубина, м	Диэлектрическая проницаемость ε	Влажность, %	Результат
Железная канистра	1,00	5,8	7,8	Обнаружена
Купол торфа	1,15	28,4	32,1	Обнаружена

Анализ данных, представленных в таблице 3, показывает, что увеличение влажности материалов сопровождается ростом их диэлектрической

проницаемости. Наиболее существенное изменение наблюдается для грунтов и суглинков, что объясняется высокой диэлектрической проницаемостью воды по сравнению с минеральными компонентами. Полученные результаты согласуются с известными теоретическими положениями и литературными данными. Установленная зависимость позволяет использовать значения диэлектрической проницаемости, определяемые по георадарным данным, для оценки влажностного состояния дорожной конструкции и прогнозирования процессов расслоения её слоев.

На рисунке 28 представлена экспериментально установленная зависимость диэлектрической проницаемости от влажности исследуемых материалов. Полученная калибровочная зависимость подтверждает возможность применения георадарных измерений для оценки состояния дорожной одежды и выявления участков с повышенной влажностью.

Выводы

В работе выполнена экспериментальная проверка методики интерпретации георадарных данных методом зондирования с использованием георадара «Лоза-В». Показано, что применение комплексной обработки радарограмм позволяет повысить качество выделения отражающих горизонтов и выполнить переход от временного разреза к глубинному с определением геоэлектрических характеристик исследуемой среды. Экспериментально подтверждена зависимость между диэлектрической проницаемостью и влажностью грунта, что позволяет использовать предложенный подход для оценки состояния дорожных конструкций и прогнозирования подповерхностных дефектов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Пупатенко, В. В., Сухобок, Ю. А., Стоянович, Г. М.** Определение электрофизических свойств грунтов в откосных зонах земляного полотна при георадарном обследовании // Мир транспорта. – 2020. – Т. 21, № 4. – С. 50–59.

2 **Дьяков, А. Ю.** Георадар как инструмент для решения горных задач // Геофизика и недропользование. – 2019. – № 3.–С.27–35.

3 **Старовойтов, А. В., Владов, М. Л.** Интерпретация данных георадиолокационных наблюдений // Разведка и охрана недр. – 2001. – № 3. – С. 11–14.

4 **Цао Ц., Аль-Кади, И. Л.** Разработка численной модели для прогнозирования диэлектрических свойств гетерогенного асфальтобетона // Sensors. – 2021. – Vol. 21(8). – Art. 2643. – https://doi.org/10.3390/s21082643.

5 **Фань Б., Боск Ф., Лю И., Фошар К.** Измерение диэлектрических свойств дорожных покрытий из горячей асфальтобетонной смеси с помощью коаксиального зонда с открытым концом : от лабораторных испытаний к полевым исследованиям // NDT & E International. – 2023. – Vol. 138. – 102872. – https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102872.

6 Характеризация асфальтового покрытия методом георадиолокации с использованием антенной решетки воздушного базирования // NDT & E International. – 2023. – Vol. 133. – 102726. – https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2022.102726.

7 **Домитрович Й., Дукич М., Безина Ш., Станчерич И., Рукавина Т.** Надежность методов интерпретации данных георадарного зондирования для определения толщины слоя асфальта // Материалы 8-й Международной конференции по дорожной и железнодорожной инфраструктуре (CETRA 2024). – 2024.

8 **Старовойтов, А. В., Романова, А. М., Калашников, А. Ю.** Возможности георадиолокации при изучении ослабленных зон в верхней части разреза // Инженерные изыскания. – 2011. –№ 4. – С. 62–70.

9 **Старовойтов, А. В., Пятилова, А. М., Шалаева, Н. В., Калашников, А. Ю.** Выделение пустот методом георадиолокации // Инженерные изыскания. – 2013. – № 13. – С. 26–33.

10 **Daniels, D. J.** Ground penetrating radar. – 2nd ed. – London : IET, 2017. – 726 p. – ISBN 978-1-78561-062-9.

11 **Benedetto, A., Pajewski, L.** Civil engineering applications of ground penetrating radar. – Cham : Springer, 2015. – 380 p. – ISBN 978-3-319-04812-3. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-04813-0.

12 **Annan, A. P.** Ground-penetrating radar principles, procedures and applications // Sensors. – 2016. – Vol. 16, № 3. – P. 312. – https://doi.org/10.3390/s16030312.

13 **Lai, W. W. L., Dérobert, X., Annan, A. P.** A review of ground penetrating radar application in civil engineering // NDT & E International. – 2018. – Vol. 96. – P. 1–15. – https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.12.003.

14 **Alsharahi, G., Faize, A., Kassou, M.** Estimation of soil dielectric permittivity using GPR data // Journal of Applied Geophysics. – 2019. – Vol. 170. – P. 103831. – https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103831.

15 **Tosti, F., Pajewski, L.** Signal processing of GPR data for road surveys // Geosciences. – 2019. – Vol. 9, № 2. – P. 96. – https://doi.org/10.3390/geosciences9020096.

16 Программа обработки георадарных данных. Krot. [Электронный ресурс]. – URL: https://georadar-loza.ru/vozmojnosti/krot/ (Дата обращения: 24.11.2025).

17 **Ван С., Чжан Ю., Хуан С., Цзинь Г., Ма Т.** Прогнозирование плотности асфальтового покрытия с использованием георадара (GPR) с учетом калибровки модели на основе теории смесей и коррекции по высоте // Construction and Building Materials. – 2025. – Vol. 494. – Art. 143401. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143401.

REFERENCES

1 **Pupatenko, V. V., Sukhobok, Yu. A., Stoyanovich, G. M.** Opredelenie elektrofizicheskikh svoystv gruntov v otkosnykh zonakh zemlyanogo polotna pri georadarnom obsledovanii [Determination of electrophysical properties of soils in slope zones during GPR survey]// Mir transporta. – 2020. – Vol. 21, № 4. – P. 50–59.

2 **D'yakov, A. Yu.** Georadar kak instrument dlya resheniya gornykh zadach [Ground-penetrating radar as a tool for solving mining problems]// Geofizika i nedropol'zovanie. – 2019. – № 3. – P. 27–35.

3 **Starovoytov, A. V., Vladov, M. L.** Interpretatsiya dannykh georadiolokatsionnykh nablyudeniy [Interpretation of ground-penetrating radar observation data]// Razvedka i okhrana nedr. – 2001. – № 3. – P.11–14.

4 **Cao Q., Al-Qadi I. L.** Development of Numerical Model to Predict the Dielectric Properties of Heterogeneous Asphalt Concrete // Sensors. – 2021. – Vol. 21(8). – Art. 2643. – https://doi.org/10.3390/s21082643

5 **Fan B., Bosc F., Liu Y., Fauchard C.** Dielectric Measurement by Open-Ended Coaxial Line for Hot-Mix Asphalt Roads: From Laboratory Test to On-Site Investigation // NDT & E International. – 2023. – Vol. 138. – 102872. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102872.

6 Asphalt Pavement Characterization by GPR Using an Air-Coupled Antenna Array // NDT & E International. – 2023. – Vol. 133. – 102726. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2022.102726.

7 **Domitrović J., Dukić M., Bezina Š., Stančerić I., Rukavina T.** Reliability of GPR Data Interpretation Methods for Determining the Thickness of Asphalt Layer // Proceedings of the 8th International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA 2024). – 2024.

8 **Starovoytov, A. V., Romanova, A. M., Kalashnikov, A. Yu.** Vozmozhnosti georadiolokatsii pri izuchenii oslablennykh zon v verkhney chasti razreza [Capabilities of ground-penetrating radar in studying weakened zones in the upper part of geological sections]// Inzhenernye izyskaniya. – 2011. – № 4. – P. 62–70.

9 **Starovoytov, A. V., Pyatilova, A. M., Shalaeva, N. V., Kalashnikov, A. Yu.** Vydelenie pustot metodom georadiolokatsii [Detection of cavities using ground-penetrating radar]// Inzhenernye izyskaniya. – 2013. – № 13. – P. 26–33.

10 **Daniels, D. J.** Ground penetrating radar. – 2nd ed. – London : IET, 2017. – 726 p. – ISBN 978-1-78561-062-9.

11 **Benedetto, A., Pajewski, L.** Civil engineering applications of ground penetrating radar. – Cham : Springer, 2015. – 380 p. – ISBN 978-3-319-04812-3. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-04813-0.

12 **Annan, A. P.** Ground-penetrating radar principles, procedures and applications // Sensors. – 2016. – Vol. 16, № 3. – P. 312. –https://doi.org/10.3390/s16030312.

13 **Lai, W. W. L., Dérobert X., Annan A. P.** A review of ground penetrating radar application in civil engineering // NDT & E International. – 2018. – Vol. 96. – P. 1–15. – https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.12.003.

14 **Alsharahi, G., Faize, A., Kassou, M.** Estimation of soil dielectric permittivity using GPR data // Journal of Applied Geophysics. – 2019. – Vol. 170. – P. 103831. – https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103831.

15 **Tosti, F., Pajewski, L.** Signal processing of GPR data for road surveys // Geosciences. – 2019. – Vol. 9, № 2. – P. 96. – https://doi.org/10.3390/geosciences9020096.

16 Programma obrabotki georadarnykh dannykh Krot [Program for processing GPR data Krot]. [Electronic resource]. – URL: https://georadar-loza.ru/vozmojnosti/krot/ (Accessed date : 24.11.2025).

17 **Wang S., Zhang Y., Huang X., Jin G., Ma T.** Asphalt Pavement Density Prediction Using GPR Incorporating Mixing Theory Model Calibration and Height Correction // Construction and Building Materials. – 2025. – Vol. 494. – Art. 143401. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143401.

Поступило в редакцию 06.04.26.
Поступило с исправлениями 23.04.26.
Принято в печать 31.08.26.

**И. М. Орман[1], К. Т. Искаков[2]*
[1]М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті,
Қазақстан Республикасы, Петропавл қ.;
[2]Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

06.04.26 ж. баспаға түсті.
23.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ГЕОРАДАР ДЕРЕКТЕРІН ЗОНДТАУ ӘДІСІ АРҚЫЛЫ РАДАРОГРАММАЛАРДЫ ИНТЕРПРЕТАЦИЯЛАУ

Бұл мақалада «Лоза-В» георадарын қолдана отырып жүргізілген эксперименттік зерттеулер мысалында георадар деректерін бастапқы өңдеу және интерпретациялау әдістемесі баяндалады. Зерттеу полигоны ретінде біртекті орта болып табылатын, өзен құмынан құралған құмды карьер учаскесі таңдап алынды. Аталған карьер Астана қаласының маңында орналасқан және салыстырмалы түрде қарапайым геологиялық жағдайларымен сипатталады, бұл оны георадиолокациялық зондтау әдістерін сынау және верификациялау үшін тиімді тәжірибелік алаң ретінде пайдалануға мүмкіндік береді. Далалық эксперименттер барысында зерттелетін аумақта белгілі тереңдіктерде орналасқан табиғи және жасанды текті әртүрлі объектілер қарастырылды. Өлшеулер жүргізу үшін зондтау әдісі қолданылды, бұл әдісте антенна мен электромагниттік сигнал көзі болжанған жерасты объектісінің ортасынан бірдей қашықтықтарға жылжытылады. Мұндай тәсіл ортаның толқын таралу жылдамдықтарын және қабаттардың қалыңдығын анықтаудың дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді. Жұмыста георадар көмегімен жүргізілген эксперименттік зерттеулер нәтижесінде алынған радарограммалар сериясына интерпретация жасалды, соның ішінде шағылған толқындарды, георадарлық кешендерді және жергілікті аномалияларды айқындау жүзеге асырылды. Алынған нәтижелер коэффициенттік кері есептерді шешу үшін, атап айтқанда, төселме қабаттың геофизикалық қасиеттерін – диэлектрлік өтімділік пен электр өткізгіштікті анықтау мақсатында пайдаланылды. Ұсынылған әдістеме инженерлік-геологиялық ізденістерде, грунттардың күйін диагностикалауда және жерасты ортасындағы ақауларды болжау кезінде қолданылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: георадиолокация, георадар кешендері, зондтау әдісі, радарограмма, диэлектрлік өтімділік, геологиялық қима, жыныс ылғалдылығы.

**I. M. Orman[1], K. T. Iskakov[2]*
[1]M. Kozybayev North Kazakhstan University,
Republic of Kazakhstan, Petropavlovsk;
[2]L.N.Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana.
Received 06.04.26.
Received in revised form 23.04.26.
Accepted for publication 31.08.26.

INTERPRETATION OF RADAR DATA FROM GEORADAR BY THE PROBING METHOD

This article presents a methodology for the primary processing and interpretation of experimental ground-penetrating radar (GPR) data based on experimental studies carried out using the "Loza-V" georadar. A sandy quarry section composed of river sand and representing a homogeneous medium was selected as the research site. The quarry is located near the city of Astana and is characterized by relatively simple geological conditions, which makes it suitable as a test area for developing and validating ground-penetrating radar sounding techniques. During the field experiments, various natural and artificial objects buried at known depths were investigated within the study area. Measurements were performed using the sounding method, in which the antenna and the electromagnetic signal source are moved symmetrically at equal distances from the center of the presumed subsurface object. This approach makes it possible to improve the reliability of determining wave propagation velocities in the medium as well as the thicknesses of subsurface layers. The study includes the interpretation of a series of radargrams obtained from the experimental GPR surveys, involving the identification of reflected waves, GPR complexes, and local anomalies. The results are used to solve coefficient inverse problems, in particular to determine the geophysical properties of the underlying layer, such as dielectric permittivity and electrical conductivity. The proposed methodology can be applied in engineering-geological investigations, soil condition assessment, and the prediction of defects in the subsurface environment.

Keywords: ground penetrating radar, georadar systems, sounding method, radargram, dielectric permittivity, geological section, soil moisture.

МРНТИ 50.47.29
https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/499-511

С. Ф. Починок[1], А. Д. Обозов[2], А. В. Лаврентьев[3], А. Ю. Ромадин[4]
[1]Кыргызский государственный технический
университет имени И. Раззакова,
Кыргызская Республика, г. Бишкек;
[2,3]Лаборатория возобновляемых источников энергии
Национальной академии наук Кыргызской Республики,
Кыргызская Республика, г. Бишкек;
[4]Павлодарский филиал АО «Национальный
центр экспертизы и сертификации»,
Республика Казахстан, г. Павлодар.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2262-2283
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7854-5831
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6884-8980
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9514-4187
*e-mail: info@incomcompany.kz

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ БАРБОТАЖНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В АНАЭРОБНОМ БИОРЕАКТОРЕ

В работе рассматривается автоматическое управление режимами барботажного перемешивания субстрата в анаэробном биореакторе с использованием биогаза в качестве рабочей среды. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения стабильного и воспроизводимого режима перемешивания при анаэробном сбраживании, а также снижения зависимости технологического процесса от действий оператора. Для автоматизации периодической подачи биогаза применены электромагнитный клапан 2W-250-25 и реле времени DH-48S-S, обеспечивающие работу пневматической системы по заданной временной программе.

Целью исследования является оценка эффективности автоматического временного управления пневматическим перемешиванием субстрата и определение его влияния на удельный выход биогаза по сравнению с ручным режимом. Экспериментальные

исследования проведены на биогазовой установке БЭМ-100 в термофильном режиме при температуре 51–56 °С.

Основные задачи исследования включают анализ принципа барботажного перемешивания, реализацию автоматического управления подачей биогаза, обеспечение заданной периодичности работы системы и экспериментальное сравнение ручного и автоматического режимов. В автоматическом режиме барботаж осуществлялся с интервалом 4 ч 30 мин при продолжительности подачи биогаза 30 с.

По результатам восьми наблюдений средний удельный выход биогаза при ручном режиме составил 99,35 м³/т, а при автоматическом режиме – 125,63 м³/т. Абсолютное увеличение составило 26,28 м³/т, относительное увеличение по отношению к ручному режиму – 26,45 %. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и модернизации систем управления пневматическим перемешиванием в малых и средних биогазовых установках.

Ключевые слова: анаэробный биореактор, биогазовая установка, барботажное перемешивание, пневматическое перемешивание, автоматическое управление, электромагнитный клапан, реле времени.

Введение

Анаэробное сбраживание органических отходов рассматривается как один из способов одновременного получения энергетического продукта и стабилизированного органического остатка. На эффективность процесса влияют температура, состав и влажность сырья, гидравлические условия, микробиологическая активность и характер перемешивания среды [1]. Для малых и средних установок особое значение имеют решения, которые позволяют поддерживать технологический режим без сложной и дорогостоящей системы управления.

Перемешивание обеспечивает перераспределение субстрата, тепла и микробных популяций в объеме реактора и уменьшает вероятность образования застойных зон и локальных скоплений твердой фазы. При этом чрезмерно интенсивное перемешивание повышает собственное энергопотребление установки и не всегда приводит к пропорциональному росту выхода биогаза. Поэтому в современной литературе рассматриваются периодические режимы, позволяющие сочетать достаточную однородность среды с ограничением вспомогательных энергетических затрат [2].

Одним из вариантов является газовое, или барботажное, перемешивание, при котором часть образующегося биогаза повторно подается в реактор

через распределительную систему. Такой подход позволяет отказаться от механической мешалки внутри реактора и переносит основную задачу управления на газовую магистраль, запорно-регулирующую арматуру и временной режим подачи газа [3].

Конструктивная основа рассматриваемой системы связана с биогазовой установкой, в которой биогаз отбирается из реактора, проходит через водяной затвор и ресивер и затем подается к барботерам с перфорированными насадками [4]. Для снижения зависимости режима перемешивания от действий оператора ранее был предложен алгоритм программного управления подачей газа в метатенк биогазовой установки [5]. Экспериментальные данные по ручному и автоматическому режимам были получены в рамках исследования автоматизации пневматической системы перемешивания [6].

Актуальность настоящей работы определяется необходимостью представить конструкцию и алгоритм управления как единую инженерную систему и количественно сопоставить эксплуатационные результаты двух способов включения барботажа. Цель исследования – оценить эффективность автоматического временного управления пневматическим перемешиванием субстрата на основе экспериментальных данных установки БЭМ-100 и определить изменение удельного выхода биогаза относительно ручного режима.

Материалы и методы

Экспериментальная установка и пневматическая система перемешивания. Исследование выполнено на биогазовой установке БЭМ-100, работавшей в термофильном режиме при температуре 51–56 °С. В качестве сырья использовались пищевые отходы. В отдельных наблюдениях масса загружаемой порции составляла от 140 до 200 кг. Перед загрузкой сырье подвергалось измельчению для получения более однородной по структуре массы [7].

Пневматическая система включала биохимический реактор, водяной затвор, компрессор, ресивер, коллектор, приемную и раздаточную камеры, запорный вентиль, электромагнитный клапан и барботеры. Барботеры располагались в нижней части реактора и содержали перфорированные насадки, выполненные в горизонтальной плоскости в виде радиальных лучей. Биогаз из газового пространства реактора отбирался компрессором, проходил через элементы газовой линии, аккумулировался в ресивере и через коллектор подавался к барботерам [8].

Автоматическое управление. Для автоматизации подачи газа использовались электромагнитный клапан 2W-250-25 и реле времени DH-48S-S. Клапан выполнял функцию исполнительного элемента, а реле формировало сигнал на его открытие и закрытие. Управление осуществлялось

по заданной временной программе без использования обратной связи по расходу газа, давлению или температуре. Такой принцип соответствует разомкнутому управлению по времени и обеспечивает воспроизводимость циклов при неизменных настройках [9].

Экспериментальный автоматический режим задавался периодическим открытием электромагнитного клапана. В текстовом описании испытаний и в итоговой статистической обработке диссертационной работы указан интервал между включениями 4 ч 30 мин и продолжительность подачи биогаза 30 с [10]. В настоящей статье данный режим принят как экспериментальный параметр автоматического управления.

Таблица 1 – Основные характеристики реле времени DH-48S-S

Параметр	Значение
Диапазон установки времени	0,01–99,99 с
Режим счета	прямой
Режим работы	однократный
Относительная погрешность	±1 %
Питание	220 В, 50 Гц
Коммутационная способность	1 реле, 5 А, 250 В
Индикация	четырехразрядный LED-индикатор
Рабочая температура	+5…+50 °C
Относительная влажность	35–85 %
Габариты	48 × 48 × 110 мм
Масса	не более 200 г

Организация сравнения. Были рассмотрены две серии наблюдений: ручное включение пневматического перемешивания и автоматическое временное управление. При ручном режиме оператор выполнял барботаж в дневной период с 09:00 до 17:00 с интервалом около трех часов; в ночное время включение не осуществлялось. При автоматическом режиме циклы выполнялись по заданной временной программе независимо от присутствия оператора [11].

Для каждого наблюдения фиксировались масса загруженного сырья и суточный объем полученного биогаза. Удельный выход приводился к одной тонне сырья с использованием принятого в исходной экспериментальной методике коэффициента пересчета. Для отдельного наблюдения расчет можно представить выражением:

$$V_i = v_i \cdot k_i \quad (1)$$

где V_i — приведенный выход биогаза, м³/т; v_i — суточный объем биогаза, м³; k_i — коэффициент приведения фактической массы загрузки к одной тонне.

Среднее значение для серии из n наблюдений рассчитывалось по формуле:

$$\bar{V} = (V_1 + V_2 + \ldots + V_n) / n \quad (2)$$

Абсолютное изменение определялось как разность средних значений автоматического и ручного режимов:

$$\Delta V = \bar{V}_{авт} - \bar{V}_{руч} \quad (3)$$

Относительное изменение по отношению к ручному режиму рассчитывалось как:

$$I = [(\bar{V}_{авт} - \bar{V}_{руч}) / \bar{V}_{руч}] \cdot 100\,\% \quad (4)$$

Экспериментальные материалы содержат по восемь наблюдений для каждого режима. Статистическая значимость различий в настоящей работе не оценивалась, поскольку исходные материалы не содержат структуры независимых повторностей, необходимой для корректного применения критерия значимости.

Результаты и обсуждение

При ручном режиме включение барботажа зависело от рабочего времени оператора. Полученные значения удельного выхода биогаза представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты работы БЭМ-100 при ручном режиме перемешивания

Сутки	Масса загрузки, кг	Коэффициент к 1 т	Суточный выход, м³	Выход, м³/т
1	180	5,5	18,46	101,53
3	190	5,2	19,48	101,296
5	190	5,2	18,83	97,916
7	200	5,0	18,48	92,40
9	200	5,0	19,69	98,45
11	200	5,0	17,52	87,60
13	180	5,5	18,19	100,045
15	200	5,0	23,12	115,60

Сумма восьми значений удельного выхода при ручном режиме составила 794,837 м³/т. Средний удельный выход равен:

$$V_{руч} = 794{,}837 / 8 = 99{,}35 \text{ м}^3/\text{т} \quad (5)$$

Во второй серии включение пневматического перемешивания выполнялось автоматически по временной программе. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты работы БЭМ-100 при автоматическом режиме перемешивания

Сутки	Масса загрузки, кг	Коэффициент к 1 т	Суточный выход, м³	Выход, м³/т
1	180	5,5	14,56	80,08
3	180	5,5	21,00	115,50
5	200	5,0	27,93	139,65
7	180	5,5	22,39	123,145
9	150	6,6	17,02	112,332
11	170	5,8	25,93	150,394
13	170	5,8	23,04	133,632
15	140	7,1	21,18	150,378

Сумма приведенных значений автоматического режима составила 1005,11 м³/т, а средний удельный выход:

$$V_{авт} = 1005{,}11 / 8 = 125{,}63 \text{ м}^3/\text{т} \quad (6)$$

Абсолютное изменение среднего удельного выхода составило:

$$\Delta V = 125{,}63 - 99{,}35 = 26{,}28 \text{ м}^3/\text{т} \quad (7)$$

При использовании ручного режима как базового относительное изменение составляет:

$$I = [(125{,}63 - 99{,}35) / 99{,}35] \cdot 100\,\% = 26{,}45\,\% \quad (8)$$

Таблица 4 – Сравнительные показатели двух режимов

Показатель	Ручной режим	Автоматический режим
Количество наблюдений	8	8
Средний удельный выход биогаза, м³/т	99,35	125,63
Абсолютное изменение, м³/т	—	+26,28
Относительное изменение к ручному режиму, %	—	+26,45

В исходных диссертационных материалах итоговый эффект также обозначен как увеличение на 21 %. Вместе с тем приведенные там же средние значения 99,35 и 125,63 м³/т дают при нормировании на ручной режим 26,45 %. Поэтому в настоящей статье относительный прирост рассчитан непосредственно по экспериментальным средним и указан с явным выбором ручного режима в качестве базы сравнения [12].

Полученные данные показывают, что автоматизация изменила прежде всего организацию процесса: циклы барботажа выполнялись по фиксированной программе и перестали зависеть от присутствия оператора. Это соответствует общему направлению исследований периодического перемешивания, где повторяемость режима и снижение избыточной продолжительности работы перемешивающего оборудования рассматриваются как важные факторы устойчивой эксплуатации.

Результат согласуется с выводами исследований газового перемешивания анаэробных реакторов, согласно которым эффективность определяется не только интенсивностью воздействия, но и распределением газового потока, реологией субстрата и геометрией реактора. В исследуемой конструкции биогаз распределяется через систему радиальных перфорированных насадок, поэтому наблюдаемое изменение нельзя приписывать исключительно электромагнитному клапану или реле времени: эффект относится к работе комплекса «пневматическая система – газораспределительные элементы – временной алгоритм».

Преимуществом временного управления является простота реализации на стандартных промышленных компонентах. Одновременно фиксированный алгоритм имеет ограничение: он не адаптируется автоматически к изменению давления, расхода газа, температуры или свойств субстрата. Для дальнейшего развития системы целесообразно дополнить управление датчиками технологических параметров и оценить энергетические затраты на компримирование биогаза. Подобный подход соответствует современным работам, в которых оптимизация перемешивания рассматривается совместно с энергетическим балансом установки.

Заключение

В работе представлена инженерная схема автоматического управления пневматическим перемешиванием субстрата в биогазовой установке. В качестве рабочего газа используется биогаз, образующийся в процессе анаэробного сбраживания. Его подача к барботерам осуществляется через газовую магистраль с компрессором, ресивером, коллектором и электромагнитным клапаном, управляемым реле времени. Сравнение двух экспериментальных серий показало, что переход от ручного включения к

автоматическому временному режиму сопровождался увеличением среднего удельного выхода биогаза с 99,35 до 125,63 м³/т. Автоматизация также обеспечивает повторяемость циклов и снижает зависимость процесса от присутствия оператора. Результаты относятся к условиям установки БЭМ-100 и требуют дальнейшей проверки на других составах сырья и режимах эксплуатации.

Выводы

1. Реализован способ автоматического управления пневматическим перемешиванием, основанный на электромагнитном клапане 2W-250-25 и реле времени DH-48S-S.

2. При ручном режиме средний удельный выход биогаза по восьми наблюдениям составил 99,35 м³/т; при автоматическом режиме – 125,63 м³/т.

3. Абсолютное увеличение среднего удельного выхода составило 26,28 м³/т. При расчете относительно ручного режима относительное увеличение составило 26,45 %.

4. Применение временного управления обеспечивает воспроизводимую периодичность барботажа и может быть использовано как технически простое решение для малых и средних биогазовых установок. Перспективой дальнейших исследований является переход к управлению с обратной связью и прямое измерение энергозатрат на перемешивание.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Веденев А. Г., Веденева Т. А.** Биогазовые технологии. – г. Бишкек, 2017. – 97 с.

2 **Лаврентьев А. В.** Влияние выхода биогаза в различных режимах включения системы перемешивания субстанции в биогазовых установках // Евразийское научное объединение. – М., 2021. – № 1(71). – С. 112–114.

3 **Лаврентьев А. В., Веденев А. Г.** Автоматизация и управление процессом перемешивания сырья в реакторе биогазовой установки // Научный и информационный журнал «Материаловедение». – Бишкек, 2013. – № 2(3). – С. 261–263.

4 **Обозов А. Дж., Лаврентьев А. В.** Алгоритм программного управления режимом перемешивания сырья в метатенке биогазовой установки // Проблемы автоматики и управления. – 2021. – № 2(41). – С. 56–60.

5 **Веденев А. Г., Лаврентьев А. В.** Биогазовая установка: патент Кыргызской Республики № 1624; заявка № 20130081.1; заявл. 03.09.2013; опубл. 30.04.2014.

6 **Лаврентьев А. В.** Автоматизация пневматической системы перемешивания субстанции на биогазовой установке: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.08. – Бишкек : Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, 2021. – 134 с.

7 **Singh B., Szamosi Z., Siménfalvi Z.** Impact of mixing intensity and duration on biogas production in an anaerobic digester: a review. Critical Reviews in Biotechnology // Critical Reviews in Biotechnology. – 2020. – Vol. 40, no. 4. – P. 508–521. – https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1731413

8 **Zhang J., Mao L., Nithya K., Loh K.C., Dai Y., He Y., Tong Y.W.** Optimizing mixing strategy to improve the performance of an anaerobic digestion waste-to-energy system for energy recovery from food waste // Applied Energy. – 2019. – Vol. 249. – P. 28–36. – https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.142

9 **Bergamo U., Viccione G., Coppola S., Landi A., Meda A., Gualtieri C.** Analysis of anaerobic digester mixing: Comparison of long-shafted paddle mixing vs gas mixing // Water Science and Technology. – 2020. – Vol. 81, no. 7. – P. 1406–1419. – https://doi.org/10.2166/wst.2020.248

10 **Kujawiak S., Makowska M., Mazurkiewicz J.** The effect of hydraulic conditions in barbotage reactors on aeration efficiency // Water. – 2020. – Vol. 12, no. 3. – Art. 724. – https://doi.org/10.3390/w12030724

11 **Dabiri S., Noorpoor A., Arfaee M., Kumar P., Rauch W.** CFD modeling of a stirred anaerobic digestion tank for evaluating energy consumption through mixing // Water. – 2021. – Vol. 13, no. 12. – Art. 1629. – https://doi.org/10.3390/w13121629

12 **Wei P., Uijttewaal W., Spanjers H., van Lier J.B., de Kreuk M.** Optimising flow and mixing in a full-scale gas-mixed anaerobic digester by integrating sludge rheological data using computational fluid dynamics // Chemical Engineering Journal. – 2023. – Vol. 468. – Art. 143647. – https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143647

REFERENCES

1 **Vedenev A. G., Vedeneva T. A.** Biogazovyye tekhnologii [Biogas technologies]. – Bishkek, 2017. – 97 p.

2 **Lavrentyev A. V.** Vliyaniye vykhoda biogaza v razlichnykh rezhimakh vklyucheniya sistemy peremeshivaniya substantsii v biogazovykh ustanovkakh [Influence of biogas yield under different operating modes of the substrate mixing system in biogas plants] // Yevraziyskoye nauchnoye ob'yedineniye [Eurasian Scientific Association]. – Moscow, 2021. – № 1(71). – Pp. 112–114.

3 **Lavrentyev A. V., Vedenev A. G.** Avtomatizatsiya i upravleniye protsessom peremeshivaniya syr'ya v reaktore biogazovoy ustanovki [Automation and control of the feedstock mixing process in a biogas plant reactor] // Nauchnyy i informatsionnyy zhurnal «Materialovedeniye» [Scientific and Information Journal "Materials Science"]. – Bishkek, 2013. – № 2(3). – Pp. 261–263.

4 **Obozov A. Dzh., Lavrentyev A. V.** Algoritm programmnogo upravleniya rezhimom peremeshivaniya syr'ya v metatenke biogazovoy ustanovki [Algorithm of software control of the feedstock mixing mode in the methane tank of a biogas plant] // Problemy avtomatiki i upravleniya [Problems of Automation and Control]. – 2021. – № 2(41). – Pp. 56–60.

5 **Vedenev A. G., Lavrentyev A. V.** Biogazovaya ustanovka [Biogas plant]: Patent of the Kyrgyz Republic № 1624; application № 20130081.1; filed 03.09.2013; published 30.04.2014.

6 **Lavrentyev A. V.** Avtomatizatsiya pnevmaticheskoy sistemy peremeshivaniya substantsii na biogazovoy ustanovke [Automation of a pneumatic substrate mixing system in a biogas plant]. Candidate of Technical Sciences dissertation, specialty 05.14.08. – Bishkek : Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, 2021. – 134 p.

7 **Singh B., Szamosi Z., Siménfalvi Z.** Impact of mixing intensity and duration on biogas production in an anaerobic digester: a review. Critical Reviews in Biotechnology // Critical Reviews in Biotechnology. – 2020. – Vol. 40, no. 4. – P. 508–521. – https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1731413

8 **Zhang J., Mao L., Nithya K., Loh K.C., Dai Y., He Y., Tong Y.W.** Optimizing mixing strategy to improve the performance of an anaerobic digestion waste-to-energy system for energy recovery from food waste // Applied Energy. – 2019. – Vol. 249. – P. 28–36. – https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.142

9 **Bergamo U., Viccione G., Coppola S., Landi A., Meda A., Gualtieri C.** Analysis of anaerobic digester mixing: Comparison of long-shafted paddle mixing vs gas mixing // Water Science and Technology. – 2020. – Vol. 81, no. 7. – P. 1406–1419. – https://doi.org/10.2166/wst.2020.248

10 **Kujawiak S., Makowska M., Mazurkiewicz J.** The effect of hydraulic conditions in barbotage reactors on aeration efficiency // Water. – 2020. – Vol. 12, no. 3. – Art. 724. – https://doi.org/10.3390/w12030724

11 **Dabiri S., Noorpoor A., Arfaee M., Kumar P., Rauch W.** CFD modeling of a stirred anaerobic digestion tank for evaluating energy consumption through mixing // Water. – 2021. – Vol. 13, no. 12. – Art. 1629. – https://doi.org/10.3390/w13121629

12 **Wei P., Uijttewaal W., Spanjers H., van Lier J.B., de Kreuk M.** Optimising flow and mixing in a full-scale gas-mixed anaerobic digester by integrating sludge rheological data using computational fluid dynamics // Chemical Engineering Journal. – 2023. – Vol. 468. – Art. 143647. – https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143647

Поступило в редакцию 04.09.26.
Поступило с исправлениями 04.09.26.
Принято в печать 07.09.26.

**С. Ф. Починок[1], А. Дж. Обозов[2], А. В. Лаврентьев[3], А. Ю. Ромадин[4]*
[1]И. Раззаков атындағы Қырғыз мемлекеттік техникалық университеті,
Қырғыз Республикасы, Бішкек қ.;
[2,3]Қырғыз Республикасы Ұлттық ғылым академиясының
жаңартылатын энергия көздері зертханасы,
Қырғыз Республикасы, Бішкек қ.;
[4]«Ұлттық сараптау және сертификаттау орталығы»
АҚ Павлодар филиалы,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
04.09.26 ж. баспаға түсті.
04.09.26 ж. түзетулерімен түсті.
07.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АНАЭРОБТЫ БИОРЕАКТОРДАҒЫ БАРБОТАЖДЫҚ АРАЛАСТЫРУ РЕЖИМДЕРІН БАСҚАРУ

Жұмыста биогазды жұмыс ортасы ретінде пайдалана отырып, анаэробты биореактордағы субстратты барботаждық араластыру режимдерін автоматты басқару қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі анаэробты ашыту кезінде тұрақты және қайталанымды араластыру режимін қамтамасыз ету, сондай-ақ технологиялық процестің оператор әрекеттеріне тәуелділігін төмендету қажеттілігімен негізделген. Биогазды мерзімді түрде беруді автоматтандыру үшін пневматикалық жүйенің берілген уақыт бағдарламасы бойынша жұмыс істеуін қамтамасыз ететін 2W-250-25 электромагниттік клапаны және DH-48S-S уақыт релесі қолданылды.

Зерттеудің мақсаты субстратты пневматикалық араластыруды уақыт бойынша автоматты басқарудың тиімділігін бағалау және оның қолмен басқару режимімен салыстырғандағы биогаздың меншікті шығымына әсерін анықтау болып табылады.

Эксперименттік зерттеулер БЭМ-100 биогаз қондырғысында 51–56 °С температурада термофильді режимде жүргізілді.

Зерттеудің негізгі міндеттеріне барботаждық араластыру принципін талдау, биогаз беруді автоматты басқаруды іске асыру, жүйе жұмысының берілген мерзімділігін қамтамасыз ету және қолмен басқару мен автоматты режимдерді эксперименттік салыстыру кіреді. Автоматты режимде барботаж 4 сағ 30 мин аралықпен, биогазды беру ұзақтығы 30 с болған жағдайда жүзеге асырылды.

Сегіз бақылаудың нәтижелері бойынша қолмен басқару режиміндегі биогаздың орташа меншікті шығымы 99,35 м³/т, ал автоматты режимде 125,63 м³/т құрады. Абсолюттік өсім 26,28 м³/т, ал қолмен басқару режиміне қатысты салыстырмалы өсім 26,45 % болды. Алынған нәтижелер шағын және орта биогаз қондырғыларындағы пневматикалық араластыруды басқару жүйелерін әзірлеу және жаңғырту кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: анаэробты биореактор, биогаз қондырғысы, барботаждық араластыру, пневматикалық араластыру, автоматты басқару, электромагниттік клапан, уақыт релесі.

**S. F. Pochinok[1], A.D. Obozov[2], A. V. Lavrentyev[3], A. Yu. Romadin[4]*
[1] I. Razzakov Kyrgyz State Technical University,
Kyrgyz Republic, Bishkek;
[2,3]Laboratory of Renewable Energy Sources,
National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic,
Kyrgyz Republic, Bishkek;
[4]Pavlodar Branch of JSC National Center
for Expertise and Certification,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Received 04.09.26.
Received in revised form 04.09.26.
Accepted for publication 07.09.26.

CONTROL OF GAS-SPARGING MIXING REGIMES IN AN ANAEROBIC BIOREACTOR

The paper considers automatic control of barbotage mixing modes of the substrate in an anaerobic bioreactor using biogas as the working medium. The relevance of the study is determined by the need to ensure a stable and reproducible mixing regime during anaerobic digestion, as well as to reduce the dependence of the technological process on operator actions. To automate the periodic supply of biogas, a 2W-250-25 solenoid valve and a DH-48S-S time relay were used, ensuring operation of the pneumatic system according to a preset timing program.

The purpose of the study is to evaluate the efficiency of automatic time-based control of pneumatic substrate mixing and to determine its effect on the specific biogas yield compared with the manual operating mode. Experimental studies were carried out on the BEM-100 biogas plant under thermophilic conditions at a temperature of 51–56 °C.

The main objectives of the study include analysis of the barbotage mixing principle, implementation of automatic biogas supply control, ensuring the specified periodicity of system operation, and experimental comparison of manual and automatic modes. In the automatic mode, barbotage was performed at intervals of 4 h 30 min with a biogas supply duration of 30 s.

According to the results of eight observations, the average specific biogas yield was 99.35 m³/t in the manual mode and 125.63 m³/t in the automatic mode. The absolute increase was 26.28 m³/t, while the relative increase compared with the manual mode was 26.45 %. The obtained results can be used in the development and modernization of pneumatic mixing control systems for small- and medium-scale biogas plants.

Keywords: anaerobic bioreactor, biogas plant, barbotage mixing, pneumatic mixing, automatic control, solenoid valve, time relay.

SRSTI 44 29 33

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/512-525

***G. Suleymenova[1], A. Uakhitova[2], B. Bainiyazov[3]**

[1,2,3]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
Republic of Kazakhstan, Astana.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1404-5095
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6317-8178
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1103-2329
*e-mail: suleymenovago@mail.ru

OPTIMISATION OF 110 kV NETWORK OPERATING MODES USING REACTIVE POWER FLOW CONTROL

This research paper examines the optimisation of steady-state operating conditions in 110 kV high-voltage power networks, using the Astana power hub as a case study. The subject of the study is a section of the 110 kV network comprising 12 key substations equipped with various types of power transformers. The study calculates steady-state conditions for winter and summer peak load periods using the 'moment rule' method for closed loop circuits, which enabled the power distribution across network sections to be determined with sufficient accuracy. Based on these calculations, active and reactive power flows were determined, and transmission losses and voltage levels at load nodes were estimated. The most heavily loaded sections of the network, characterised by a drop in voltage levels during peak load periods, were identified. The data obtained provided a basis for demonstrating the need for local reactive power control to normalise system operation. The feasibility of controlling reactive power flows was established as an optimisation method. It is proposed to install compensation devices with a capacity of 4–6 Mvar at nodes with the highest reactive power consumption. Simulation results showed that the use of compensation devices allows voltage levels to be stabilised and active power losses in the network to be reduced.

Keywords: optimisation, control, electrical network, losses, operating modes, methods, reactive power, compensation.

Introduction

110 kV high-voltage power networks play a major and crucial role in the distribution of electrical energy. Optimising their operation is essential for improving the reliability of the power supply, enhancing power quality and reducing losses [1].

In the energy sector, the optimisation of operating modes refers to the process of selecting operating parameters for the power system that ensure the best possible value for a given efficiency criterion, whilst strictly adhering to technical and technological constraints; in simpler terms, it involves finding the 'happy medium' between the reliability of the power supply and the lowest possible costs [2].

In the modern energy sector, the tasks involved in optimising operating modes can be divided into technical, economic and technological categories, but they are all aimed at managing the modes of the power system, which is based on controlling its components via separate control systems:

1. Minimising active power losses is one of the priority tasks, as reducing losses directly affects the energy efficiency of the system;
2. Voltage level control, i.e. maintaining the voltage within the limits specified by GOST;
3. Optimisation of the reactive power balance;
4. Ensuring static and dynamic stability;
5. Economic load distribution [3].

Given the complex nature of the tasks outlined above, the most cost-effective and efficient tool for urban distribution networks is the regulation of reactive power flows. This is because reactive power regulation stabilises voltage levels at load nodes and reduces losses without the need for costly line upgrades or equipment replacement. The aim of this work is to analyse the steady-state conditions of the Astana power node and to justify measures for their optimisation using compensation devices. To achieve this aim, numerical modelling methods and analytical calculations of power flow distribution parameters in closed networks based on the rule of moments are employed. A detailed description of the methods used is provided in the following section.

Materials and methods

In any system, there are constant changes in parameters such as frequency, voltage, the phase angle between the voltages at different points in the system, active and reactive power, and so on. The state of the power system, characterised by technical parameters and the condition of equipment during the generation, transmission and consumption of electrical energy, whilst maintaining a balance between generation and load, is referred to as the power system operating mode [3, 4].

The components of the operating mode control system are: the active power and frequency control system (P, f), the reactive power and voltage control system (Q, U), and the ES emergency control system (Figure 1) [4]. These three subsystems interact with one another to carry out overall control of the system's operation based on real-time information received from the information system (IS). This is a set of organisational and technical measures aimed at ensuring a reliable, high-quality and cost-effective power supply to consumers. It includes operational control, dispatching, voltage regulation, active and reactive power regulation, as well as the automation of protection and restoration of operating modes.

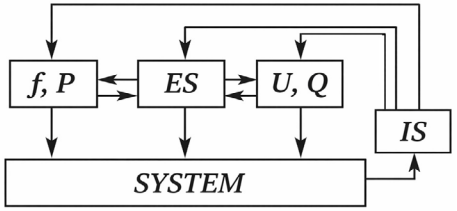


Figure 1 – General control of power supply system modes.

Controlling a system's operating modes is a complex, multifaceted task that must be addressed under dynamically changing load conditions and relies on the use of computing technology in conjunction with economic and mathematical models. For the purposes of analysis, with a view to determining the best methods for optimising operating modes, we shall consider the single-line diagram of the Astana power substation, shown in Figure 2 [5, 6].

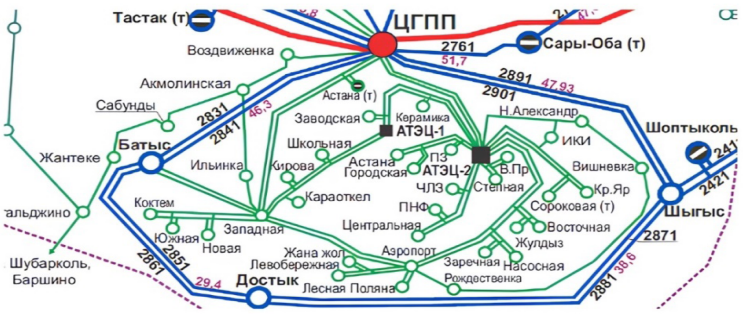


Figure 2 – Schematic diagram of the single-line diagram for the city of Astana, showing the ---- 110 kV and ---- 220 kV overhead lines.

Astana's power system comprises more than 30 key substations equipped with power transformers of the two-winding and three-winding types. Twelve substations were selected for the optimisation calculations (Table 1), along with actual summer and winter electricity loads.

Table 1 – List of 110 kV substations and information on the load (automatic) of transformers at the Astana power hub (Data from Astana Regional Power Grid Company)

Substation name	Voltage	names of trans-formers	Rated power of transformers		Transformer loading	Transformer loading
	kV		MVA	MWt	MWt	%
«Zhuldiz» substations	110/10	T-1	40	36	17.3	48.18
		T-2	40	36	15.4	42.65
«Vostochnaya» substations	110/35/10	T-1	40	36	10.9	23.06
		T-2	40	36	13.3	23.89
«Baiterek» substations	110/20	T-1	63	56.7	2.0	3.57
		T-2	63	56.7	1.6	2.87
«Nasosnaya» substations	11/20/ 10	T-1	25	22.5	3.2	14.44
		T-2	25	22.5	2.9	12.84
«Zarechnaya» substations	110/10	T-1	63	56.7	10.4	18.32
		T-2	63	56.7	16.8	29.56
«Aeroport» substations	110/20/10	T-1	63	56.7	11.8	20.78
		T-2	63	56.7	11.8	20.78
		T-3	16	14.4	4.6	32.13
		T-4	16	14.4	4.0	28.00
«Zhana Zhol» substations	110/10	T-1	80	72	24.7	34.25
		T-2	80	72	17.3	23.99
«Levoberezhnaya» substations	110/10	T-1	63	56.7	6.1	10.83
		T-2	63	56.7	16.9	29.78
«Zapadnaya» substations	110/10/6	T-1	10	9	4.2	46.90
		T-2	10	9	3.6	39.60
		T-3	40	36	1.4	3.93
		T-4	40	36	1.2	3.43

«Novaya» substations	110/10	T-1	40	36	23.5	65.33
		T-2	40	36	22.1	61.25
«Yuzhnaya» substations	110/10	T-1	25	22.5	2.5	11.32
		T-2	25	22.5	2.5	11.32
«Koktem» substations	110/10	T-1	63	56.7	13.5	17.28
		T-2	63	56.7	16.4	21.16

Let us perform the network calculations for winter load conditions. As the selected facilities have a closed power supply circuit with a single source (220 V central heating substation), we will use the closed-circuit calculation method; however, we will first model the circuit diagram shown in Figure 3.

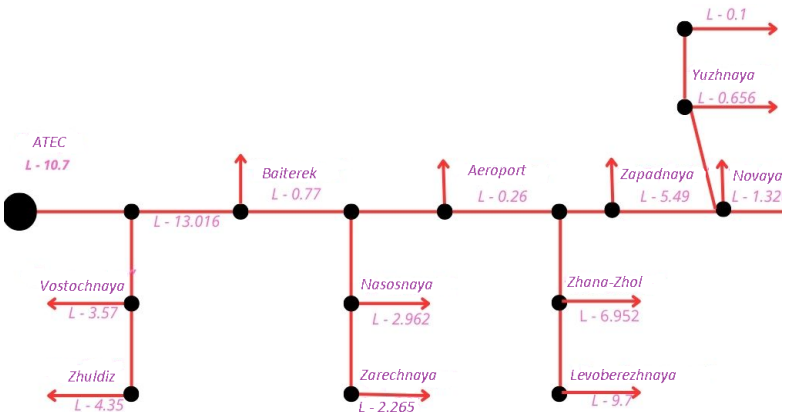


Figure 3 – Schematic diagram of the 110 kV power grid in Astana

In order to determine the power of each section of the circuit, we first calculate the power of the sections closest to the sources (SATЭЦ2 and SЦГТП). We determine these terminal powers in accordance with the rules for the moment, using the formula [7, 8]:

$$S_{ATEC2\text{-}Bait}= ((S_{Vost}+S_{Zhul})\times L_1 + (S_{Bait}\times L_{1\div2}) + (S_{Nas}+S_{Zar})\times L_{1\div3} + (S_{Aer}\times L_{1\div4}) + (S_{ZhZh} +S_{Lev})\times L_{1\div5} + (S_{Zap}\times L_{1\div6}) + (S_{Nov}+S_{Yuzh}+ S_{Kok})\times L_{1\div7})/\sum L_{1\div8};\ \text{MBA}$$

$$S_{ATEC2\text{-}Nov} = ((S_{Nov}+S_{Yuzh}+ S_{Kok})\times L_8+ (S_{Zap}\times L_{8\div7}) + (S_{ZhZh}+S_{Lev})\times L_{8\div6} + (S_{Aer}\times L_{8\div5}) + (S_{Nas}+S_{Zar})\times L_{8\div4} + (S_{Bait} \times L_{8\div3}) + (S_{Vost}+S_{Zhul})\times L_{8\div2})/\sum L_{1\div8}, \quad (1)$$

We shall determine the power in the remaining sections of the closed circuit using Kirchhoff's first law [7, 8]:

$$\begin{aligned} S_{Nov\text{-}Zap}&=S_{ATEC2\text{-}Nov} - S_{Nov};\ \text{MBA}.\\ S_{Zap\text{-}ZhZh}&=S_{Nov\text{-}Zap} - S_{Zap};\ \text{MBA}.\\ S_{ZhZh\text{-}Aer}&=S_{Zap\text{-}ZhZh} - S_{ZhZh};\ \text{MBA}.\\ S_{Aer\text{-}Nas}&=S_{ZhZh\text{-}Aer} - S_{Aer};\ \text{MBA}.\\ S_{Nas\text{-}Bait}&=S_{Aer\text{-}Nas} - S_{Nas};\ \text{MBA}.\\ S_{Bait\text{-}Vost}&=S_{Nas\text{-}Bait} - S_{Bait};\ \text{MBA}. \end{aligned} \quad (2)$$

We calculate the power of the sections not included in the ring using the summation method; after calculating all the powers, we determine the line losses, which can be divided into active power losses (ΔP; MWt) and reactive power losses (ΔQ; MVar), charging power (ΔQC; MVar) and voltage drop (ΔU; kV) [7, 8].

Active power losses are defined as:

$$\Delta Pi = \left(\frac{Spi}{Un}\right)^2 \times \frac{R_l}{n}, \quad (3)$$

where U_n – rated line voltage, kV;
R_l – active line resistance, Ohms;
n – the number of circuits in a power line.

Reactive power losses are defined as:

$$\Delta Qi = \left(\frac{Spi}{Un}\right)^2 \times \frac{X_l}{n}, \quad (4)$$

where X_l is the reactive resistance of the line, in Ohms.
The power-carrying capacity of a power line is defined as:

$$Qc = \left(\frac{Boi\times Li\times n\times Un^2}{2}\right), \quad (5)$$

where *Bo* is the specific insulation capacity of the overhead power line, sm/km;
L – line length, km.
All the calculation results are summarised in Table 2.

Table 2 – Results of the calculation of the line's electrical parameters under winter load conditions

Power allocation by section		Losses under winter load conditions					
plot	S,MVA	I, A	Kz. lines	ΔP; MWt	ΔQ; MVAr	ΔU; кV	ΔQ_c; MVAr
«ATEC 2-Baiterek»	72,3	190	52706	0.053	0.145	0.68	3.25
«Vostochnaya-Zhuldiz»	51,6	136	9432	0.0094	0.026	0.16	1.13
«Zhuldiz-Baiterek»	67,7	178	77625	0.0775	0.2126	1.14	5.44
«Baiterek-Nasosnaya»	61.3	161	10368	0.0114	0.03128	0.17	0.98
«Nasosnaya-Zarechnaya»	61.3	161	6843	0.00688	0.01887	0.11	0.59
«Nasosnaya-Aeroport»	61.3	161	29109	0.009	0.02467	0.14	0.77
«Aeroport-Zhana Zhol»	92.2	243	66312	0.0661	0.1812	0.71	2.5
«Zhana Zhol-Levoberezhnaya»	92.2	243	85916	0.08562	0.2348	0.92	3.24
«Zhana Zhol-Zapadnaya»	73	192	82833	0.08295	0.2275	1.11	5.0
«Zapadnaya-Novaya»	37	97	4808	0.00484	0.01328	0.12	1.14
«Novaya-Yuzhnaya»	42.5	112	2420	0.00241	0.00662	0.06	0.43
«Yuzhnaya-Koktem»	61.3	161	3188	0.0032	0.00877	0.05	0.27
Total losses:	∑ΔU;%	∑ΔP;%	∑ΔQ;%				
	1.42	0.07	0.24				

Similarly, based on the circuit diagram (Figure 3) and the above formulas, it is possible to calculate the electrical parameters of the line under summer load conditions. Let us plot the graphs of electrical loads and power losses under winter load conditions (Figure 4). Analysis of the calculation data presented in the graph has enabled us to identify the sections of the network with the highest load and to determine the nodes characterised by a local reactive power deficit. Although the total technical power losses in transmission lines do not exceed the standard values, a tendency towards a drop in voltage levels is observed at a number of

remote nodes during periods of peak load. This justifies the need to implement measures to regulate reactive power flows in order to ensure the required stability margin and power supply quality in accordance with standards [9]. From this, it can be concluded that there is a voltage imbalance in the network. To address this issue, the reactive power flow control method can be applied. Of course, there are other optimization methods, such as changing the number of circuits or the cross-section of transmission line conductors, which would require replacing all supporting structures. From an economic point of view, this is considered costly. Similarly, the method of increasing the nominal voltage of the network implies replacing all substation transformers, which is practically unfeasible. Compared to these methods, the reactive power flow control method is less labor-intensive, yet it addresses the critically important task of maintaining voltage levels at network nodes and minimizing power losses. Based on these control methods, systems can be categorised according to the equipment used and the specific problem to be solved [10]:

1. the use of compensating devices, the most common method, based on the generation or absorption of reactive power at the point of consumption (capacitor banks, reactors, static thyristor compensators and synchronous compensators);

2. regulation using synchronous machines, whose generators and motors are the most flexible sources of reactive power (synchronous generators, synchronous compensators);

3. adjustment of transformation ratios: a method that does not generate new power but redistributes power flows between networks of different classes (transformers with on-load tap changers, voltage-boosting transformers);

4. influencing network parameters – FACTS, which are modern control methods that allow the resistance of lines affecting power flow distribution to be altered (longitudinal compensation devices, controllable shunt reactors, SVC, STATCOM) [11].

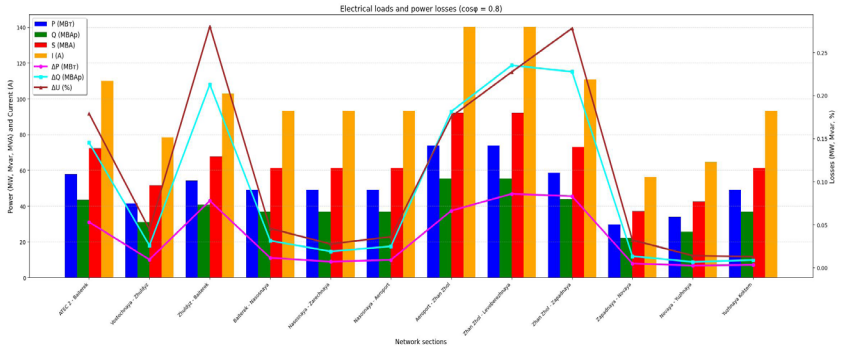


Figure 4 – Graphs showing electrical loads and power losses under winter load conditions

A comparative analysis of the methods considered shows that, within the context of the 110 kV grid of the Astana power hub, the most rational approach is to install static reactive power sources at load centers. This method is effective for local voltage stabilization and allows lines to be relieved of excessive power flows without the need for large-scale grid reconstruction. Based on the results of steady-state calculations (see Table 2), the nodes where the installation of additional reactive power generation sources is required have been identified. Thus, further optimization of the network's operation can be achieved by installing compensating devices at these critical nodes [11, 12].

As an example, let us install reactive power compensation units for transverse reactive power compensation in power grid substations where reactive power consumption is higher. We select the capacity of the compensation units so as to avoid over-compensation of reactive power.

Table 3 – Capacity of compensation equipment at individual substations

Substation name	Reactive power of the substation Qs; MVAr	Reactive power of the compensation device Qcd; MVAr
Zhana Zhol	8	6
Aeroport	6,3	6
Novaya	4,25	4

Figure 5 shows the graph of electrical loads and power losses following optimisation using the method of adjusting reactive power flows under winter load conditions. Following optimisation using the reactive power compensation

method, the graphs show that the voltage drop has decreased and is now within the optimal permissible range.

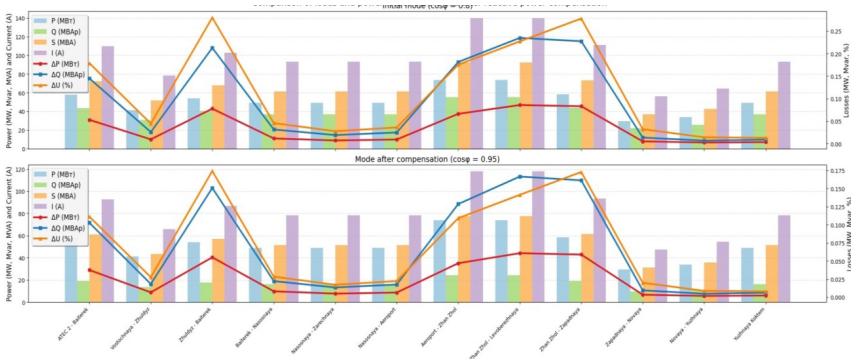


Figure 5 – Graphs showing electrical loads and power losses before and after optimisation under winter electrical load conditions

Results and discussion

Based on an analysis of the electrical load and power loss graphs (Figure 5), key findings have been identified that demonstrate the impact of reactive power compensation on the operating mode of the 110 kV network:

1 Stabilisation of voltage levels: reactive power compensation led to a reduction in voltage drops at load nodes, bringing them into line with regulatory values.

2 Reduction of network current load: an increase in the power factor at the «Zhana Zhol», «Aeroport» and «Novaya» nodes reduced the operating current in the feeder lines.

3 Reduction in transmission losses: the reduction in reactive power flows from the source to the load has led to a minimisation of active power losses, thereby improving the energy efficiency of the network.

Thus, the use of compensation devices in the 110 kV network under study ensures effective regulation of voltage levels and a reduction in operating current, confirming the advisability of using this method to optimise the network's operating modes [12].

Conclusion

As part of a study of steady-state operating conditions in the 110 kV network of the Astana power hub, a comprehensive assessment of the system's condition was carried out and sections requiring optimisation of electricity parameters were identified. Modelling of winter and summer peak operating conditions confirmed that technical losses in the system comply with regulatory requirements; however, a

need for local voltage support was identified in nodes furthest from power sources. It was established that the most rational way to normalise the operating conditions is to install compensating devices, which would eliminate reactive power deficits at the points of consumption and improve the overall energy efficiency of the distribution network.

The analysis carried out has shown that regulating reactive power flows is a rational and technically sound method of optimising grid operating conditions. The installation of 4–6 MVar compensation units at the «Zhana Zhol», «Aeroport» and «Novaya» substations has enabled the normalization of voltage levels and a reduction in current loads on the lines.

The results obtained confirm the effectiveness of using compensation devices to improve power quality and reduce power losses in 110 kV networks. The proposed solutions can be utilised in the planning and optimization of operating modes for distribution networks.

REFERENCES

1 **Antonov, A. I.** Optimization of 110 kV distribution network modes taking into account distributed generation and reactive power compensation / A. I. Antonov, S. V. Volkov // Electric Power. Transmission and Distribution. – 2023. – No. 4 (79). – P. 32–40.

2 **Belyaev, A. N.** Voltage and reactive power control of power systems: a textbook / A. N. Belyaev. – Saint Petersburg : Lan, 2024. – 188 p.

3 **Vasiliev, K. A.** Application of static thyristor compensators for voltage stabilization in 110–220 kV networks / K. A. Vasiliev, V. V. Petrov // Power Engineering: Research, Equipment, Technology. – 2022. – Vol. 24, No. 3. – P. 85–96.

4 **Razokov, F. M.** Methods for optimizing the operation mode of 110 kV high-voltage electrical networks / F. M. Razokov // Bulletin of PITTU named after M.S. Osimi. – 2018. – Vol. 16, No. 3. – P. 44–52.

5 **Gamazin, S. I.** Modern methods and means of reactive power compensation in power supply systems / S. I. Gamazin, I. I. Tsyruk, V. N. Stepanov. – Moscow : MPEI Publishing House, 2021. – 156 p.

6 **Dmitriev, S. A.** Algorithms for automatic voltage and reactive power regulation in smart grids / S. A. Dmitriev, P. I. Bartolomey // Elektricheskie Stantsii (Electric Stations). – 2025. – No. 2. – P. 14–21.

7 **Karpov, A. S.** Comparative analysis of methods for optimizing reactive power flow distribution in closed 110 kV networks / A. S. Karpov // Energetik. – 2023. – No. 11. – P. 27–31.

8 **Kostin, V. N.** Optimization of power system modes: a textbook / V. N. Kostin. – 2nd ed. – Saint Petersburg: Lan, 2022. – 148 p.

9 **Papkov, B. V.** Efficiency of reactive power compensation in the context of digital transformation of the energy sector / B. V. Papkov, M. V. Sharygin // Vestnik of Kazan State Power Engineering University. – 2024. – Vol. 16, No. 1. – P. 44–55.

10 **Savintseva, Yu. I.** Modeling of reactive power compensation devices to reduce losses in high-voltage networks / Yu. I. Savintseva // Vestnik of ISPU. – 2023. – Iss. 5. – P. 112–119.

11 **Zhang X., Gui X., Sun P., Li X., Zhang Y., Wang X., Dang C., Liu X.** Reactive Power Optimization of a Distribution Network Based on Graph Security Reinforcement Learning / X. Wang, Y. Liu [et al.] // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15, No. 15. – Art. 8209. – https://doi.org/10.3390/app15158209

12 **Okushko I. S., Ivanov V. V. et al.** Optimization of CCGT Start-Up Ramp Rate to Improve Voltage Quality in a 110/220 kV Power System Node / I. S. Okushko, V. V. Ivanov et al. // Energies. – 2026. – Vol. 19, No. 4. – Art. 1028. – https://doi.org/10.3390/en19041028

Received 04.04.26.
Received in revised form 27.04.26.
Accepted for publication 31.08.26.

**Г. О. Сулейменова[1], А. Б. Уахитова[2], Б. А. Байниязов[3]*
[1,2,3]Казахский агротехнический исследовательский
университет имени С.Сейфуллина,
Республика Казахстан, г. Астана.
04.04.26 ж. баспаға түсті.
27.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЕТИ 110 КВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В данной научной статье рассматриваются вопросы оптимизации установившихся режимов работы высоковольтных электрических сетей напряжением 110 кВ на примере Астанинского энергоузла. Объектом исследования является фрагмент сети 110 кВ, включающий 12 ключевых подстанций с различными типами силовых трансформаторов. В работе выполнен расчет установившихся

режимов для периодов зимнего и летнего максимумов нагрузок с применением метода «правила моментов» для замкнутых кольцевых цепей, что позволило определить распределение мощностей по участкам сети с достаточной точностью. На основе расчетов определены перетоки активной и реактивной мощностей, а также оценены технологические потери и уровни напряжения в узлах нагрузки. Были идентифицированы наиболее нагруженные участки сети, характеризующиеся снижением уровней напряжения в периоды максимумов нагрузки. Полученные данные позволили обосновать необходимость локального регулирования реактивной мощности для нормализации режима. В качестве метода оптимизации обоснована целесообразность регулирования потоков реактивной мощности. Предложена установка компенсирующих устройств мощностью 4–6 МВАр в узлах с наибольшим потреблением реактивной мощности. Результаты моделирования показали, что применение компенсирующих устройств позволяет стабилизировать уровни напряжения и снизить потери активной мощности в сети.

Ключевые слова: оптимизация, управление, электрическая сеть, потери, режимы работы, методы, реактивная мощность, компенсация.

**Г. О. Сулейменова[1], А. Б. Уахитова[2], Б. А. Байниязов[3]*
[1,2,3]С. Сейфуллин атындағы Қазақ
агротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.
Поступило в редакцию 04.04.26.
Поступило с исправлениями 27.04.26.
Принято в печать 31.08.26.

РЕАКТИВТІ ҚУАТ АҒЫНЫН БАСҚАРУ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ 110 КВ ЖЕЛІЛІК ЖҰМЫС РЕЖИМІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Бұл зерттеу мақаласы 110 кВ жоғары кернеулі электр желілеріндегі тұрақты жұмыс режимдерін оңтайландыру мәселелерін қарастырады және мысал ретінде Астана энергетикалық хабын пайдаланады. Зерттеу объектісі – әртүрлі типтегі қуат трансформаторларымен жабдықталған 12 негізгі қосалқы станциядан тұратын 110 кВ желінің бір бөлігі. Зерттеуде жабық

контурлы желілер үшін «момент ережесі» әдісі қолданылып, қысқы және жазғы ең жоғары жүктеме кезеңдеріне арналған тұрақты режим жағдайлары есептелді, бұл желі бөлімдері арасындағы қуат таралуын жеткілікті дәлдікпен анықтауға мүмкіндік берді. Есептеулер негізінде белсенді және реактивті қуат ағындары анықталып, беріліс шығындары мен жүктеме түйіндеріндегі кернеу деңгейлері бағаланды. Ең көп жүктелген, шыңдық жүктеме кезеңдерінде кернеу деңгейінің төмендеуімен сипатталатын желінің бөлімдері анықталды. Алынған деректер жұмыс жағдайларын қалыпқа келтіру үшін жергілікті реактивті қуатты басқару қажеттігін негіздеді. Реактивті қуат ағындарын басқарудың мүмкіндігі оңтайландыру әдісі ретінде көрсетілді. Ең жоғары реактивті қуат тұтыну көрсеткіші бар түйіндерге 4–6 Мвар сыйымдылығы бар компенсациялық құрылғыларды орнату ұсынылады. Симмуляция нәтижелері компенсациялық құрылғыларды қолдану кернеу деңгейін тұрақтандырып, желідегі белсенді қуат шығындарын азайтатынын көрсетті.

Кілтті сөздер: оңтайландыру, басқару, электр желісі, шығындар, жұмыс режимдері, әдістер, реактивті қуат, компенсация.

МРНТИ 44.31.35
https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/526-539

Г. М. Тютебаева[1], *Н. Н. Саракешова[2], Н. Т. Мергалиев[3], Г. С. Катранова[4], А. К. Жумалиева[5]
[1,2,5]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана;
[3]QazaqGaz Aimaq, Республика Казахстан, г. Астана;
[4]Феникс Интернешнл Ресорсиз Каспиан, Республика Казахстан, г. Алматы.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3503-2569
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9362-7740
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0688-5324
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7101-775X
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0342-1869
*e-mail: n.sarakeshova@kazatu.edu.kz

ПЕРЕВОД ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ ТЭЦ-2 г. АСТАНЫ НА СЖИГАНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Представленная работа посвящена оценке направлений развития энергетики при росте электропотребления, опережающем увеличение использования первичных энергоресурсов, и связанному с этим усилению антропогенной нагрузки на окружающую среду. Показано, что расширение генерирующих мощностей на традиционных видах топлива сопровождается увеличением объёмов вредных выбросов, что требует внедрения более эффективных и экологически безопасных решений. Проведён анализ состояния атмосферного воздуха города Астаны, которые включают детальный состав атмосферного воздуха, выполнены расчёты образования загрязняющих веществ при эксплуатации котла КВ-Т-139,6-150. Рассмотрены изменения уровней выбросов при переводе оборудования с угольного топлива на природный газ, результаты представлены в сравнительной форме. Показано, что повышение топливной и энергетической эффективности оборудования способствует не только сокращению удельных выбросов, но и общему снижению их суммарного объёма. Обоснована целесообразность поэтапной газификации котлов Тепловой электрической централи – 2 (ТЭЦ-2) и строительства Тепловой электрической централи – 3 (ТЭЦ-3) с использованием парогазовых технологий как меры повышения экологической безопасности и устойчивости городской энергетической системы. Полученные результаты могут быть использованы при планировании модернизации энергетических объектов.

Ключевые слова: водогрейная котельная, реконструкция, горелка, система газоснабжения, природный газ, выбросы вредных веществ, экология.

Введение

На территории города Астаны функционирует несколько сотен промышленных и энергетических объектов, являющихся источниками выбросов в атмосферный воздух. В процессе их деятельности в воздушную среду поступает порядка сорока различных загрязняющих веществ.

Активное развитие промышленного сектора, интенсивное жилищное строительство и устойчивый рост численности населения приводят к увеличению спроса на тепловую и электрическую энергию. В результате возрастает тепловая нагрузка на энергетические объекты города, что вынуждает теплоэлектроцентрали и районные котельные наращивать установленную мощность. Это, в свою очередь, сопровождается увеличением объёмов потребляемого топлива и, как следствие, ростом выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

К таким объектам относятся теплоэлектроцентрали ТЭЦ-1, ТЭЦ-2, ТЭЦ-3, а также восемь районных водогрейных котельных. Совокупная доля указанных объектов в общем объёме выбросов от стационарных источников составляет порядка 47 процентов.

Согласно данным Информационного бюллетеня о состоянии окружающей среды Республики Казахстан за январь 2025 года, контроль состояния атмосферного воздуха в Астане осуществляется на десяти стационарных постах наблюдения, включая четыре пункта ручного отбора проб и шесть автоматизированных станций [1]. Дополнительно измерения проводятся передвижной лабораторией на восьми контрольных точках. В совокупности система мониторинга позволяет оценивать до двадцати трёх показателей качества атмосферного воздуха.

Всего в пределах города осуществляется определение до двадцати четырёх загрязняющих компонентов, к основным из которых, относятся следующий ряд веществ:

1. мелкодисперсные частицы фракций PM2,5 и PM10.
2. SO_2.
3. NO, NO_2.
4. CO_2.
5. озон.

По результатам мониторинга качества атмосферного воздуха за январь 2025 года общий уровень загрязнения воздушной среды в городе Астане был отнесён к категории повышенного.

Наибольшие уровни загрязнения атмосферного воздуха в городе, как правило, фиксируются в зимний период. Это, в первую очередь, связано с тем, что в отопительном периоде, особенно от частного сектора повышаются выбросы вредных веществ.

К тому же, увеличение количества NO_2 способствует выбросы от автотранспортных средств, особенно в зонах с интенсивным движением и на загруженных транспортных узлах.

В этой связи особую актуальность приобретает модернизация водогрейных котлов типа КВ-Т-139,6-150 ТЭЦ-2 с целью обеспечения возможности совместного сжигания природного газа и угля. В настоящее время котельная ТЭЦ-2 преимущественно эксплуатируется на природном газе, при этом экибастузский каменный уголь используется в качестве резервного топлива. Вместе с тем энергетические котлы станции продолжают функционировать на угольном топливе, что остаётся одним из значимых источников загрязнения атмосферного воздуха в городе.

Материалы и методы

При изучении рассматриваемой проблемы использовались положения нормативного документа РНД 211.2.01.01-92, а также данные, предоставленные Казахстанским научно-исследовательским гидрометеорологическим институтом и материалы Информационного бюллетеня о состоянии окружающей среды Республики Казахстан [1; 2].

Результаты и обсуждение

Водогрейная котельная ТЭЦ-2 была построена и введена в эксплуатацию в рамках проекта «Расширение и реконструкция ТЭЦ-2 с установкой котлоагрегатов ст. №№ 7, 8, турбоагрегатов ст. №№ 5, 6 и водогрейной котельной г. Астана». Реализация проекта осуществлялась в два этапа: четыре водогрейных котла были введены в эксплуатацию в 2012 году, ещё два – в 2016 году.

Эти водогрейные котлы вполне могут быть переведены для эффективной работы на газообразном топливе, если будут соблюдены все условия, такие

как: подвод газоснабжения, замена горелочные устройств, эксплуатация дымососа, замена автоматики или внесение изменений в их работу.

В рамках модернизации предусматривается замена топочно-горелочного оборудования на новые горелочные устройства производства ООО «Сибэнергомаш-БКЗ». Для обеспечения устойчивого и экологически эффективного процесса сжигания топлива топка оснащается газовыми горелками, у которых конструкция прямоточная. На рисунке 1 изображен общий вид пылегазовой горелки, которые установлены в одной полости водогрейного котла.

Данная горелка состоит из двухходового воздушного канала, в первой из которой, находятся каналы для подвода пылевоздушной смеси, а во второй части канала расположена горелка для газообразного топлива.

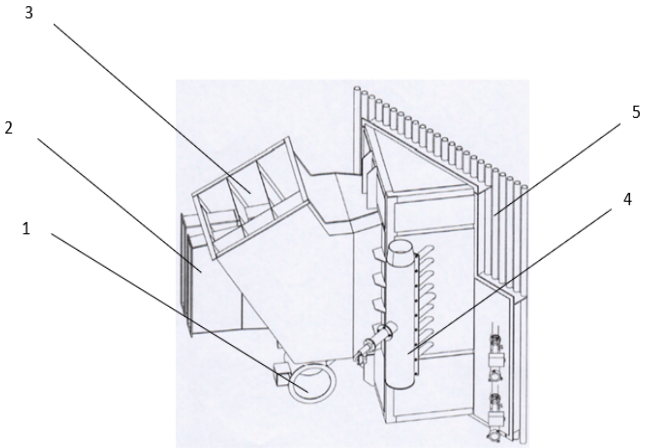


Рисунок 1 – Общий вид пылегазовой горелки

1 – подача пылевоздушной смеси; 2 – воздушные короба; 3 – вертикальные каналы, предназначенные для подачи пылевоздушной смеси; 4 – подвод газа к горелке; 5 – топочные экраны;

По трубкам коллекторов подается природный газ, от которого газообразное топливо протекает и распределяется по восьми трубкам.

Также, для стабильности работы и правильного распределения топливо воздушной смеси по всему периметру установлены направляющие стенки. Таким образом, данная конструкция позволяет эффективно и стабильно распределять, и сжигать топливо в различных режимах работы водогрейного

котла. Газовая часть горелочного устройства оборудована специальной трубой, предназначенной для установки запальника. Вблизи горелки размещена установочная коробка, на которой предусмотрены патрубки для монтажа фотодатчика контроля пламени и смотрового лючка.

Прямоточная пылегазовая горелка предназначена для подачи в топку котла необходимого количества топлива и воздуха, обеспечивающего работу агрегата во всём предусмотренном диапазоне нагрузок. Расположение горелочных устройств на стенах топки выбрано таким образом, чтобы факел равномерно заполнял рабочее сечение топочной камеры.

После этапа растопки котла на газообразном топливе, необходимо переходить на режим подачи пылевоздушной смеси, для этого нужно обеспечить сгорания газообразного топлива с устойчивым горением, при котором достигается уровень тепловой нагрузки водогрейного котла не менее 30 % от номинального значения.

При переходе режимов работы горелок на газовое топливо автоматическая система управления процессом горения должна быть отключена. В этом случае регулирование тепловой нагрузки осуществляется вручную в дистанционном режиме.

Общие технические характеристики горелки приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Общие технические характеристики горелки

№ п/п	Наименование		Значение
1	Максимальная тепловая мощность горелки, МВт		40
2	Топливо:		
2.1	природный газ с теплотворной способностью, МДж/м^3 (при 20^{0}С, Р=101 325 Па)		35,276
2.2	каменный уголь, МДж/м^3 (при 20^{0}С, Р=101 325 Па)		16,13
3	Расчетный расход газообразного топлива на горелку:		
3.1	природный газ, нм^3/час	номинальный	3 510
		минимальный	1 050
4	Расчетное давление:		
4.1	природный газ перед горелкой, кПа	номинальный	25
		минимальный	2,25
5	Расчетный расход твердого топлива, кг/час		8 514
6	Расчетное сопротивление воздушного канала горелки при работе на:		

6.1	природном газе (при α=1,03), Па	2 790
6.2	каменном угле (при α=1,18), Па	2 216
7	Расчетное сопротивление пылевоздушного тракта горелки, Па	450
8	Минимальный коэффициент избытка воздуха в диапазоне рабочего регулирования при работе на:	
8.1	природном газе	0,85
8.2	каменном угле	0,65
9	Коэффициент рабочего регулирования горелки не менее при работе на:	
9.1	природном газе	3,3
9.2	каменном угле	1,7
10	Масса горелки, кг:	
10.1	горелка пылеугольная	1 678,8
10.2	горелка газовая	172,0

Для организации системы рециркуляции дымовых газов предусматривается монтаж дымососов рециркуляции газов (ДРГ) с соответствующим газоходным трактом. Оборудование размещается внутри здания водогрейной котельной в непосредственной близости от действующих дымососов типа ДН-24К. Для каждого котлоагрегата проектом предусматривается установка индивидуального дымососа рециркуляции.

Назначением системы ДРГ является снижение концентрации оксидов азота (NO_x) в уходящих дымовых газах котла. Это достигается за счёт отбора части дымовых газов за котлом и их последующей подачи в воздушный тракт перед горелочными устройствами, а именно – к теневым смесителям, где происходит разбавление кислородсодержащего воздуха рециркуляционными газами.

Определение объёмов выбросов загрязняющих веществ выполнено на основании нормативных документов: – «Сборник методик по расчету выбросов вредных веществ в атмосферу различными производствами. Расчет выбросов вредных веществ при сжигании топлива в котлах производительностью до 30 т/ч», утверждённый 1 декабря 1996 года первым заместителем Министра экологии и биоресурсов Республики Казахстан [2; 3]; – «Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для тепловых электростанций и котельных», приложение № 3 к приказу Министра охраны окружающей среды и водных ресурсов Республики Казахстан от 12 июня 2014 года № 221 [4; 5].

При эксплуатации котлов на природном газе в атмосферу поступают следующие основные загрязняющие вещества: оксид углерода, сернистый ангидрид, оксид азота и диоксид азота.

Согласно расчётным и паспортным данным, природный газ, планируемый к подаче по магистральному газопроводу «Сары-Арка», характеризуется следующими физико-химическими показателями [6]:

– плотность – 0,763 кг/м³;
– низшая теплота сгорания – 35,6 МДж/м³;
– массовая концентрация сероводорода – 0,007 г/м³;
– массовая концентрация меркаптановой серы – 0,016 г/м³.

Основными организованными источниками выбросов загрязняющих веществ являются три дымовые трубы высотой 120 м, диаметр устья каждой трубы составляет 3 м. К данным дымовым трубам подключены источники выбросов, формируемые при работе водогрейных котлов и вспомогательного оборудования котельной:

К дымовой трубе №1 (ист. 0023) водогрейные котлы ст.№№1,2.

К дымовой трубе №2 (ист. 0024) водогрейные котлы ст.№№3,4.

К дымовой трубе №3 (ист. 0047) водогрейные котлы ст.№№5,6.

Время работы каждого из них 1590 ч/год.

Расход природного газа составляет 17530 т/г.

Итого, по ист. 0023, 0024 и 0047 расход газа составит по 45950197 м³/год, 35060 т/год [7; 8].

Молярная масса сероводорода H2S равна 34, серы 32, таким образом, концентрация серы составит 0,0066 г/м³.

Молярная масса меркаптановой серы равна 48, серы 32, таким образом, концентрация серы составит 0,0107 г/м³.

Общая массовая концентрация серы в газовом топливе составит 0,0173 г/м³.

Сернистость газа составит 2 т/г или 0,0023 %.

Для определения объема сухих дымовых газов, используется формула (1):

$$V_{\text{сг}} = \text{к} \cdot Q_j^y \qquad (1)$$

где: Q_j^y – теплота сгорания топлива, МДж/кг (МДж/м³);

k – коэффициент, учитывающий характер топлива и равный для природного газа 0,345.

Объем сухих дымовых газов по ист. 0023, 0024, 0047 составляет 12,282 м³/м³, 354950 м³/ч.

Таким образом, скорость сухих дымовых газов по ист.0023, 0024 и 0047 составит 13,96 м/с.

Для расчета значении вредных веществ в атмосферу вычисляется по формулам:

1. Расчет CO (2):

2.

$$\Pi_{\text{co}} = 0{,}001 \cdot \text{C}_{\text{co}} \cdot \text{M} \cdot (1\text{-}q_4/100) \qquad (2)$$

где:

C_{co} – выход оксида углерода при сжигании топлива;

$C_{co} = K_{co} \cdot Q_r$;

где: K_{co} – количество окиси углерода на единицу теплоты, выделяющейся при горении топлива, кг/ГДж;

g_4 – потери тепла вследствие механической неполноты сгорания топлива, %;

Q_r - низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг.

3. Расчет NO_x (3):

$$\Pi_{NO_x} = 0{,}001 \cdot \text{M} \cdot Q_r \cdot K_{NO_2} \cdot (1 - \beta) \qquad (3)$$

где:

KNO_2 – параметр, характеризующий количество оксидов азота, образующихся на 1ГДж тепла, кг/ГДж; Значения KNO_2 определяются по графикам в зависимости от номинальной нагрузки котлоагрегата;

β – коэффициент, зависящий от степени снижения выбросов оксидов азота в результате применения технических решений, β = 0.

При выполнении расчётов загрязнения атмосферного воздуха и оценке выбросов, образующихся в результате функционирования технологического оборудования и транспортных средств, после попадания в окружающую среду, необходимо учитывать процессы переноса частиц оксидов азота [9; 10].

Результаты расчетов вредных веществ в атмосферу от источников №№ 0023, 0024, 0025 приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов

№ ист	Ист выд	Ист загр	Топливо	Ед.изм.	Выбросы вредных веществ					
					Пыль 20-70 % SiO_2	Сернистый ангидрид SO_2	Оксид Углерода CO	Окислы азота NO_x	Диоксид азота NO_2	Оксид азота NO
0023	Дым труба	Котлы 1-2	При род. газ	г/с	0	0,282	17,444	21,805	17,444	2,835
				т/г	0	1,613	99,851	124,814	99,851	16,226
0024		Котлы 3-4		г/с	0	0,282	17,444	21,805	17,444	2,835
				т/г	0	1,612	99,851	124,814	99,851	16,226
0025		Котлы 5-6		г/с	0	0,282	17,444	21,805	17,444	2,835
				т/г	0	1,613	99,851	124,514	99,851	16,226
Итого				г/с	0	0,845	52,333	65,416	52,333	8,504
				т/г	0	4,838	299,553	374,441	299,553	48,677

Относительно выполненного перевода котлов на ТЭЦ-2 г. Астаны, получены следующие результаты по выходам вредных веществ:

1. NO_2 на 52,333 г/с, 299,553 т/г,
2. NO на 8,504 г/с, 48,677 т/г,
3. SO_2 на 0,845 г/с, 4,838 т/г.

К тому же, выявлены отсутствия образования двуокиси кремния при сжигании газообразного топлива, что позволяет полностью исключить выбросы пыли.

Выводы

Прогнозные оценки развития энергетического сектора, сформированные в рамках национальных программ, указывают на опережающий рост спроса на электрическую энергию по отношению к увеличению потребления первичных энергетических ресурсов. Обеспечение прогнозируемых объёмов электропотребления требует ввода дополнительных генерирующих мощностей, которая с каждым разом ведет к повышению объемов вредных веществ в атмосферу.

Для решения вышеуказанных проблем применяются методы по внедрению в топливно-энергетическую систему конструктивных решений, которые позволят достичь низкого выхода вредных, загрязняющих выбросов

и уменьшение суммарных выбросов за счёт повышения энергетической и топливной эффективности.

В рамках настоящей статьи выполнен анализ экологической обстановки г. Астана. Были произведены расчеты по количествам образования вредных веществ при работе котла КВ-Т-139,6-150, а также их сравнительный анализ, в котором были показаны результаты эффективного перевода на сжигание природного газа. Результаты расчётов представлены в виде сравнительной таблицы.

В соответствии с программой развития города Астаны предусмотрен поэтапный перевод восьми энергетических котлов ТЭЦ-2 на природный газ, а также строительство второй очереди ТЭЦ-3 с применением парогазовых установок. Основным источником газоснабжения столицы рассматривается магистральный газопровод «Сарыарка». Несмотря на существенное различие в стоимости природного газа и экибастузского каменного угля, переход на газовое топливо является необходимой и обоснованной мерой с точки зрения экологической безопасности и устойчивого развития городской энергетики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Ежемесячный информационный бюллетень о состоянии окружающей среды в РК.

2 «Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий», РНД 211.2.01.01-97.

3 «Сборник методик по расчету выбросов вредных веществ в атмосферу различными производствами. Расчет выбросов вредных веществ при сжигании топлива в котлах производительностью до 30 т/ч» (утвержден первым заместителем Министра экологии и биоресурсов РК от 01 декабря 1996 года)».

4 «Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для тепловых электростанций и котельных. Приложение № 3 к приказу Министра ОС и ВР РК от 12 июня 2014 года №221».

5 Гигиенические нормативы к атмосферному воздуху в городских и сельских населенных пунктах. Приказ МНЭ РК от 28 февраля 2015 года № 168.

6 **Dostiyarov, A.M., Sarakeshova, N.N., Yamanbekova, A.K.** THE RESULT OF THE INVESTIGATION OF A NEW MICROMODULE GAS BURNER WITH A SUDDEN EXPANSION AT THE OUTLET. – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies // ISSN 1729-3774, Vol 3/8

(129), Cite Score: 2.0, Percentile – 37 % (Q3). – 2024. – p. 6–15. – https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.303636.

7 ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ (2007) «Требования к эмиссиям в окружающую среду при сжигании различных видов топлива в котлах тепловых электрических станций». [Электронный ресурс]. – доступно по адресу: http://www.adilet.gov.kz/ru/node/1412.

8 **Третьяков, А. Н., Перегудина, Е. В. и Азарова, С. В.** (2015), «О влиянии на атмосферу предприятий теплоэнергетического комплекса», журнал «Молодой ученый», вып. № 11, с. 562–566.

9 **Gillich, A., Elmer, S., Laing, G.F., Sunderland, L., Mills, R., & Overend, M.** (2025). Market transformations: Gas conversion as a blueprint for net zero retrofit. Buildings and Cities, 6(1), – p 359–377. – https://doi.org/10.5334/bc.552.

10 **Chicherin, S., Zhuikov, A., Kuznetsov, P.** The Return of CoalFired Combined Heat and Power Plants : Feasibility and Environmental Assessment in the Case of Conversion to Another Fuel or Modernizing an Exhaust System – Sustainability 2024, 16(5), 1974. – https://doi.org/10.3390/su16051974.

REFERENCES

1 Ezhemesiachnyi informatsionnyi biulleten o sostoianii okruzhaiushchei sredy v RK [Monthly information bulletin on the state of the environment in the Republic of Kazakhstan]. Astana: Ministry of Ecology of the Republic of Kazakhstan, annual edition.

2 Metodika rascheta kontsentratsii v atmosfernom vozdukhe vrednykh veshchestv, soderzhashchikhsia v vybrosakh predpriiatii [Methodology for calculating concentrations of harmful substances in atmospheric air contained in industrial emissions]. RND 211.2.01.01-97. Astana, 1997.

3 Sbornik metodik po raschetu vybrosov vrednykh veshchestv v atmosferu razlichnymi proizvodstvami. Raschet vybrosov vrednykh veshchestv pri szhiganii topliva v kotlakh proizvoditelnostiu do 30 t/ch [Collection of methods for calculating harmful emissions into the atmosphere from various industries. Calculation of harmful emissions from fuel combustion in boilers with a capacity up to 30 t/h]. Approved by the First Deputy Minister of Ecology and Bioresources of the Republic of Kazakhstan, 01 December 1996. Almaty, 1996.

4 Metodika opredeleniia vybrosov zagriazniaiushchikh veshchestv v atmosferu dlia teplovykh elektrostantsii i kotelnykh [Methodology for determining atmospheric pollutant emissions for thermal power plants and boiler houses]. Appendix No. 3 to the Order of the Minister of Environment Protection of the Republic of Kazakhstan No. 221 dated 12 June 2014. Astana, 2014.

5 Gigienicheskie normativy k atmosfernomu vozdukhu v gorodskikh i selskikh naselennykh punktakh [Hygienic standards for atmospheric air in urban and rural settlements]. Order of the Ministry of National Economy of the Republic of Kazakhstan No. 168 dated 28 February 2015. Astana, 2015.

6 **Dostiyarov, A.M., Sarakeshova, N.N., Yamanbekova, A.K.** The result of the investigation of a new micromodule gas burner with a sudden expansion at the outlet. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 3/8 (129). P. 6–15. – https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.303636.

7 Tekhnicheskii reglament (2007) “Trebovaniia k emissiiam v okruzhaiushchuiu sredu pri szhiganii razlichnykh vidov topliva v kotlakh teplovykh elektricheskikh stantsii” [Technical Regulation (2007) “Requirements for environmental emissions during combustion of various fuels in boilers of thermal power plants”]. [Electronic resource] – Available at: http://www.adilet.gov.kz/ru/node/1412 (Accessed: 17.02.2026).

8 **Tretiakov, A. N., Peregudina, E. V., Azarova, S. V.** O vliianii na atmosferu predpriiatii teploenergeticheskogo kompleksa [On the impact of heat power industry enterprises on the atmosphere]. Molodoi uchenyi. 2015. No. 11. P. 562–566.

9 **Gillich, A., Elmer, S., Laing, G.F., Sunderland, L., Mills, R., Overend, M.** Market transformations: Gas conversion as a blueprint for net zero retrofit. Buildings and Cities. 2025. Vol. 6(1). P. 359–377. – https://doi.org/10.5334/bc.552.

10 **Chicherin, S., Zhuikov, A., Kuznetsov, P.** The Return of Coal Fired Combined Heat and Power Plants: Feasibility and Environmental Assessment in the Case of Conversion to Another Fuel or Modernizing an Exhaust System. Sustainability. 2024. Vol. 16(5). Article 1974. – https://doi.org/10.3390/su16051974.

Поступило в редакцию 15.01.26.
Поступило с исправлениями 18.03.26.
Принято в печать 31.08.26.

*Ғ. М. Түтебаева[1], *Н. Н. Саракешова[2], Н. Т. Мергалиев[3], Ғ. С. Катранова[4], А. К. Жумалиева[5]*
[1,2,5]С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[3]«QazaqGaz Aimaq» АҚ Астана өндірістік филиалы, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
[4]Phoenix International Resources Caspian ЖШС, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

15.01.26 ж. баспаға түсті.
18.03.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АСТАНА ҚАЛАСЫНДАҒЫ ЖЭО-2 СУ ЖЫЛЫТУ ҚАЗАНДЫҚТАРЫН ТАБИҒИ ГАЗ ЖАҒУҒА КӨШІРУ

Ұсынылып отырған жұмыс электр энергиясын тұтынудың бастапқы энергия ресурстарын пайдаланудың өсуінен озық қарқынмен артуы жағдайындағы энергетиканы дамыту бағыттарын бағалауға және осы үрдіске байланысты қоршаған ортаға түсетін антропогендік жүктеменің күшеюіне арналған. Дәстүрлі отын түрлерін пайдаланатын генерациялау қуаттарын кеңейту зиянды шығарындылар көлемінің ұлғаюымен қатар жүретіні көрсетілген, бұл өз кезегінде неғұрлым тиімді әрі экологиялық қауіпсіз шешімдерді енгізуді талап етеді. Астана қаласының атмосфералық ауасының жай-күйіне талдау жүргізіліп, ауаның құрамына кешенді сипаттама берілді. КВ-Т-139,6-150 қазандығын пайдалану барысында түзілетін ластаушы заттардың көлеміне есептеулер жасалды. Жабдықты көмір отынынан табиғи газға ауыстыру кезіндегі шығарындылар деңгейінің өзгерісі қарастырылып, нәтижелер салыстырмалы түрде ұсынылды. Жабдықтың отындық және энергетикалық тиімділігін арттыру меншікті шығарындыларды азайтумен қатар, олардың жалпы көлемін де қысқартуға мүмкіндік беретіні дәлелденді. Қалалық энергетикалық жүйенің экологиялық қауіпсіздігі мен тұрақтылығын арттыру мақсатында Жылу электр орталығының-2 (ЖЭО-2) қазандықтарын кезең-кезеңімен газдандыру және бу-газ технологияларын пайдалана отырып Жылу электр орталығын-3 (ЖЭО-3) салудың тиімділігі негізделді. Алынған нәтижелер энергетикалық нысандарды жаңғыртуды жоспарлау кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: су жылыту қазандығы, реконструкция, жанарғы, газбен жабдықтау жүйесі, табиғи газ, зиянды заттар шығарындылары, экология.

*G. M. Tyutebayeva[1], *N. N. Sarakeshova[2], N. T. Mergaliev[3], G. S. Katranova[4], A. K. Zhumalieva[5]*
[1,2,5]S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Republic of Kazakhstan, Astana;

[3]Astana production branch of JSC «QazaqGaz Aimaq», Republic of Kazakhstan, Astana;
[4]Phoenix International Resources Caspian LLP, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 15.01.26.
Received in revised form 18.03.26.
Accepted for publication 31.08.26.

CONVERSION OF WATER HEATING BOILERS OF TPP-2 OF ASTANA TO BURNING NATURAL GAS

The present study focuses on assessing the development pathways of the energy sector under conditions where electricity consumption grows faster than the use of primary energy resources, leading to increased anthropogenic pressure on the environment. It is demonstrated that the expansion of power generation capacities based on conventional fuels results in higher volumes of harmful emissions, which necessitates the implementation of more efficient and environmentally sound solutions. An analysis of the atmospheric air quality in Astana was carried out, including a detailed assessment of its composition. Calculations were performed to determine pollutant formation during the operation of the KV-T-139.6-150 boiler. Changes in emission levels resulting from the conversion of equipment from coal to natural gas were examined, and the findings are presented in a comparative format. The study shows that improving fuel and energy efficiency not only reduces specific emissions but also decreases total emission volumes. The feasibility of phased gasification of CHP-2 boilers and the construction of CHP-3 using combined-cycle (gas-steam) technologies is substantiated as a measure to enhance environmental safety and ensure the sustainable development of the urban energy system. The obtained results can be used in planning the modernization of energy facilities.

Keywords: hot-water boiler, reconstruction, burner, gas supply system, natural gas, atmospheric pollutant emissions, ecology.

МРНТИ 44.09.03:87.01.75
https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/540-559

Б. Хамбар[1], *А. М. Рахметова[2]
[1,2]Институт экономических исследований,
Республика Казахстан, г. Астана.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5075-3842
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8741-0373
*e-mail: aibota@mail.kz

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СЕКТОР КАЗАХСТАНА: ВЫЗОВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

В данной статье приведены результаты анализа и оценки тенденций развития энергетического сектора Республики Казахстан в контексте измерения прогресса в достижении целей устойчивого развития. Авторами проанализированы факторы, ограничивающие достижение индикаторов, установленных на национальном уровне и приводится сравнительная оценка позиций Казахстана с позициями стран, выступающих лидерами международных рейтингов в разрезе ключевых показателей развития энергетического сектора во взаимоувязке с ключевыми аспектами охраны окружающей среды. По итогам исследования, авторами были выявлены основные причинно – следственные связи, которые, вступая в определенный конфликт интересов между собой, существенным образом ограничивают не только достижение значений национальных индикаторов седьмой цели устойчивого развития «Обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех», но и негативно влияют на качество жизни населения и социально – экономическое благополучие страны в целом. В этой связи, в заключительной части статьи, авторами представлен комплекс практико-ориентированных рекомендаций, направленных на устранение возникающих провалов рынка на основе повышения эффективности энергетического менеджмента, в том числе и на уровне государствеенной системы управления.

Ключевые слова: энергетические ресурсы, возобновляемые источники энергии, государственное управление, цели устойчивого развития, выбросы.

Введение

Энергетический сектор Республики Казахстан представляет собой один из ведущих сегментов экономики, вбирающий в себя производство, транспортировку, распределение и продажу энергетических ресурсов, включая рынок топлива. Стратегическую роль энергетического сектора в развитии экономики страны трудно переоценить, так как потребление электроэнергии осуществляется по всем направлениям: промышленность, бизнес, государственный сектор, домохозяйства, экспорт. В условиях современного Казахстана развитие энергетического сектора на фоне внешних вызовов и угроз рассматривается как ключевое направление для устойчивого развития страны, испытывающее влияние сложного сочетания экологических, технологических и экологических факторов. О чем, в своих выступлениях неоднократно отмечает Глава государства: «Вопросы энергетической самодостаточности должны рассматриваться как важнейшая часть государственной политики. Производство электроэнергии в Казахстане в объеме 123,1 млрд кВт/ч явно недостаточно для успешного выполнения всех наших планов» [1].

В этой связи меры государства направлены на модернизацию инфраструктуры, создание новых мощностей, развитие альтернативных источников генерации энергии, совершенствование рыночных механизмов и привлечение инвестиций, что позволит обеспечить устойчивое развитие экономики[1*] и энергетическую безопасность страны. К числу ключевых направлений реализуемой политики следует отнести: 1) совершенствование институциональной среды (Стратегия «Казахстан – 2050», Закон «Об энергоснабжении и повышении энергоэффективности», Концепция развития сферы энергосбережения и повышения энергоэффективности до 2029 года», Национальный проект «Модернизация энергетического и коммунального секторов», утверждена Дорожная карта ЦУР 7 для Казахстана и другие); 2) цифровизация энергетической отрасли, в том числе посредством строительства «ЦОД[2**] – долина» на базе Экибастузского угольного бассейна; 3) привлечение масштабных инвестиций, в том числе посредством реализации программы «Тариф в обмен на инвестиции», согласно которой в отрасль предполагается привлечь масштабные инвестиции с целью снижения степени износа основных фондов на 20 % к 2029 году и многие другие [2; 3; 4; 5; 6; 7].

[1] Казахстан присоединился к Повестке дня в области устойчивого развития до 2030 года (ЦУР) в сентябре 2015 года, наряду со всеми государствами-членами ООН.
[2] ЦОД – центр обработки данных

Вместе с тем, достижение индикатора, в части всеобщего доступа к недорогой и чистой энергии, в Казахстане имеет свои ограничения, которые обуславливают актуальность исследуемой проблемы в силу наличия нерешенных проблем. К таковым можно отнести: изношенность сетей и оборудования (в среднем по стране более 60 %, растущее потребление (прогноз дефицита электроэнергии на 2026 год – 1,4 млрд кВт · ч), дефицит квалифицированных кадров (более 4 тыс. чел., средний возраст – 50 лет), низкие темпы развития альтернативной чистой энергетики (в условиях отсутствия атомной энергетики, темпы потребления и спроса на газ, как экологически чистого источника энергии по сравнению с углем, растут быстрее темпов его выработки и обеспечения доступа к нему), сохранение зависимости от импорта (до 85-90 % закупок из России) и другие [8; 9; 10; 11].

Таким образом, необходимость обеспечения энергетической безопасности и устойчивости на основе развития недорогих и чистых технологий при наличии все еще нерешенных вопросов, подчеркивают актуальность исследуемой темы.

Цель статьи – оценка текущих тенденций и системных проблем, ограничивающих достижение ЦУР 7 для определения приоритетных направлений развития энергетического сектора Казахстана, в том числе на основе решения нижеследующих задач:

– оценить динамику прогресса ключевых индикаторов достижения ЦУР 7, в том числе на международном уровне;

– выявить ключевые причинно – следственные связи, ограничивающие развитие энергетического сектора Казахстана в контексте достижения ЦУР 7;

– сформулировать рекомендации, направленные на нивелирование выявленных ограничений и сдерживающих энергетическую безопасность и устойчивость казахстанского энергетического сектора.

Материалы и методы

При подготовке данной статьи были использованы: 1) теоретический анализ научно-практической и периодической литературы (отечественной и зарубежной); 2) эмпирические методы научного познания, как анализ (статистический, сравнительный), метод экспертных оценок (для верификации при отсутствии точных статистических значений по отдельным индикаторам); 3) индексный метод (предполагает агрегирование объективных и субъективных данных для оценки прогресса и измерения разрыва между целевыми и фактическими данными).

Результаты и обсуждение

Энергетический сектор Казахстана представляет собой масштабную систему, основанную преимущественно на тепловых электростанциях

и угольном топливе (около 80 % генерации), гидроэлектростанциях и развивающемся секторе возобновляемых источников энергии (далее – ВИЭ) (солнечные и ветровые станции) с общей установленной мощностью свыше 26 ГВт.

Преобладание и сохранение практики использования ископаемых источников энергии (угля) в работе энергетического сектора страны существенно повышает значимость обеспечения прогресса по достижению ЦУР 7 «Недорогостоящая и чистая энергия» в условиях принятия Казахстаном глобальных обязательств по достижению углеродной нейтральности к 2060 году с целью предотвращения катастрофических последствий глобального изменения климата (Таблица 1).

Таблица 1 – Динамика структуры источников генерации, в общем объеме выработанной энергии в разрезе по видам источников за 2014–2024 годы, в %

Вид источника генерации	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Тепловые электростанции	89,6	89,1	89,1	88,2	87,2	85,1
Гидроэлектростанции	9,4	8,9	8,0	8,1	7,8	9,5
Ветровые электростанции	0,6	0,9	1,5	2,0	3,4	3,8
Солнечные электростанции	0,4	1,1	1,4	1,7	1,6	1,6
Использование биогаза	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Примечание: составлено авторами на основе источника [12]						

Переход к низко-углеродному развитию и декарбонизации экономики для Казахстана является серьезным и ответственным вызовом, требующим проведения широкомасштабных мер по всем направлениям технологической модернизации национальной экономики и, прежде всего, ее добывающих секторов. Так, Стратегией по достижению углеродной нейтральности Казахстана предусмотрено сокращение выбросов парниковых газов к 2030 году на 15 % и на 25 % при условии получения международной поддержки на декарбонизацию экономики относительно уровня 1990 года [13].

Вместе с тем, зеленый тренд в развитии энергетического рынка мира начинает все более четко проявляться и объем рынка зеленой энергетики, по итогам 2025 года, оценивается уже в 195,12 млрд дол США с перспективой увеличения до 529,57 млрд дол США к 2035 году (темп роста 10,5 %). При этом прогресс в развитии зеленой энергетики определяется не только широким спектром альтернативных источников чистой энергии в энергетическом балансе страны, но и объемом инвестиций [14]. Так, на сегодняшний день, лидерство по развитию зеленой энергетики неизменно удерживают:

1) Китай является мировым лидером по развитию ветрогенерации, солнечной генерации и выработке солнечной тепловой энергии с ежегодным объемом инвестиций в чистую энергетику – свыше 80 млрд евро;

2) США – это страна является мировым лидером по производству биотоплива (биодизельного топлива и био-этанола) с ежегодным объемом инвестиций в чистую энергетику – свыше 30 млрд евро;

3) Япония после аварии на Фукусимской АЭС переориентировалась с атомных и углеводородных электростанций на применение ВИЭ, ежегодный объем инвестиций в чистую энергетику – 8 до 12 млрд евро;

4) Индия наращивает мощности солнечной энергетики, ежегодный объем инвестиций в чистую энергетику – от 5,1 до 11,9 млрд евро в год;

5) Германия является лидером среди стран ЕС по объему инвестиций в альтернативную генерацию энергии – 8,9 млрд евро ежегодно [15].

Для сравнения, общий объем инвестиций Республика Казахстан в развитии зеленые энергетические проекты по итогам 2024 года составил лишь 20 млн евро (или 13,7 млрд тенге), несмотря на постепенно расширение спектра альтернативных источников. О недостаточных темпах достижения индикаторов ЦУР 7 свидетельствует позиция Казахстана в ежегодном рейтинге Организации объединенных наций (далее – ООН), которая оценивает прогресс в достижении индикаторов ЦУР (к 2030 году), принятых в 2015 году на основе расчета Индекса ЦУР (Таблица 2).

Таблица 2 – Динамика значений индикаторов, использованных при оценке Индекса ЦУР 7 «Доступная и чистая энергетика в Казахстане» за 2017-2025 годы

Наименование индикатора	Значение индикатора				
	2017	2019	2021	2023	2025
Население, имеющее доступ к электричеству,%	100	100	100	100	100
Население, имеющее доступ к экологически чистым видам топлива и технологиям для приготовления пищи, %	90,1	95,3	95,3	92,7	93,1
Эмиссии CO2 от сжигания топлива на единицу общего объема выработанной электроэнергии, МтCO2/ТВтч	2,3	2,2	2,1	2,7	2,2
Примечание: составлено авторами на основе источника [16]					

Как видно из таблицы, по итогам 2025 года, население страны все еще полностью не охвачено доступом к экологически чистым видам топлива и технологиям для приготовления пищи (лишь 93,1 %), а темпы снижения показателя эмиссии углекислого газа (CO_2) от сжигания топлива на единицу общего объема выработанной электроэнергии (2,2 МтCO_2/ТВтч),

отражающего углеродоемкость электроэнергии, оставляют желать лучшего. В целом, по итогам 2025 года расчет индекса ЦУР 7 по Казахстану позволил определить статус «Серьезные вызовы» и тренд «Стагнация» [16].

Приведенные данные подтверждаются и данными Базы данных выбросов для глобальных атмосферных исследований Европейского союза, которая осуществляет ежегодный мониторинг стран по такому показателю как «Выбросы углекислого газа на душу населения, CO_2 на чел» (Таблица 3).

Таблица 3 – Выбросы углекислого газа на душу населения в разрезе стран, CO_2 на чел»

Страны	2015	2020	2023	2024
Бахрейн	24,4	21,7	21,4	20,7
Саудовская Аравия	19,4	16,6	17,5	17,7
Канада	15,9	14,6	14,7	14,9
Австралия	16,8	15,5	14,4	14,4
США	16	13,5	13,6	13,6
Казахстан	11,4	12	13,2	13,3
Китай	7,7	8,4	9,0	9,1
Япония	9,6	8,4	8	7,8
Германия	9,6	7,8	7,1	7,0
Финляндия	8,4	7,1	5,8	5,5
Дания	5,9	4,5	4,5	4,3
Швейцария	4,8	4,1	3,8	3,8
Азербайджан	3,6	3,5	4,0	3,7
Швеция	4,4	3,8	3,5	3,6
Индия	1,7	1,7	2,1	2,2
Примечание: составлено авторами на основе источника [17]				

При отборе стран для формирования таблицы 3 были использованы такие критерии, как: страны – лидеры по выбросам CO_2 и страны с минимальными выбросами CO_2 с развитым промышленным сектором в сравнении с Казахстаном. Примечателен тот факт, что среди всех стран, приведенных в диаграмме, лишь в Казахстане, в Китае и в Индии – отмечена отрицательная динамика роста выбросов за исследуемый период (2015 – 11,4, 7,7 и 1,7 соответственно; 2024 –13,3, 9,1 и 2,2 соответственно), хотя по объему выбросов Китай и Индия существенно уступают Казахстану.

Важно подчеркнуть, что вопрос обеспечения энергетической безопасности и устойчивости в Казахстане выходит за рамки технических вопросов в силу своего социально-экономического характера, так

как напрямую влияет на качество жизни населения, энергетическую состоятельность и безопасность, а также климатическую устойчивость страны. В этой связи, тенденции, характеризующие развитие энергетического сектора Казахстана, формируются под давлением совокупности эндогенных и экзогенных факторов, которые образуют сложную систему причинно - следственных связей (Рисунок 1).

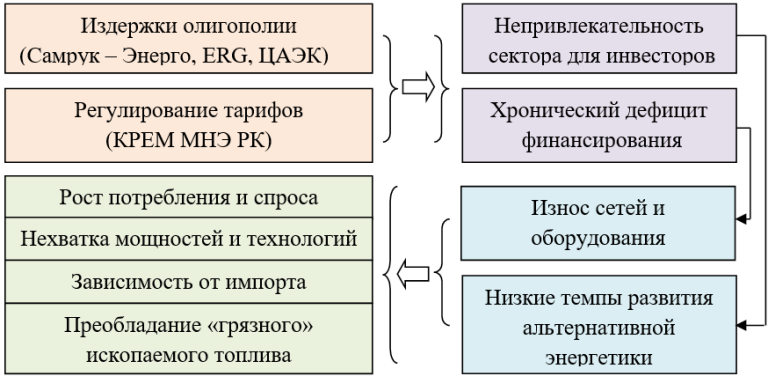


Рисунок 1 – Причинно-следственные связи, ограничивающие прогресс в достижении индикаторов ЦУР 7 «Недорогостоящая и чистая энергия»

Примечания:
1. ERG – Eurasian Resources Group - крупная горнодобывающая и сырьевая компания, ведущая деятельность в Казахстане, Бразилии и Центральной Африке;
2. ЦАЭК – Центрально-Азиатская Электроэнергетическая Корпорация – вертикально интегрированная энергетическая компания и лидер среди частных энергогенерирующих компаний Казахстана.
3. составлено авторами

Как видно из рисунка, всю совокупность факторов, оказывающих ограничивающее влияние на развитие энергетического сектора в контексте обеспечения энергетической безопасности и устойчивости можно условно разделить две группы факторов (регуляторные и технологические), влияние каждой из которых влечет за собой последствия и соответствующие эффекты для развития энергетического сектора Казахстана. Рассмотрим их подробнее.

1. Регуляторные факторы. В данной группе факторов следует отметить отсутствие, выверенных с точки зрения социального аспекта, конкретных и действенных механизмов тарифообразования (тарифы на электричество регулируются государством вследствие низких реальных доходов населения и роста инфляции), которые одновременно учитывали бы как реальные доходы населения, так и интересы субъектов энергетического сектора. В социальном плане, ситуацию усугубляет тот факт, что планируемое повышение тарифов в энергетике одновременно с повышением налогового бремени и сохранением повышенных темпов инфляции может негативно сказаться на уровне платежеспособности населения и субъектов хозяйствования. Вместе с тем, по мнению экспертов, именно недостаточное финансирование энергетического сектора не позволяет сформировать достаточный объем инвестиций на формирование запасов электроэнергии (не менее 20 % от общего объема производства).

В условиях недостатка действенных механизмов гарантий долгосрочной инвестиционной привлекательности и безопасности (ограниченный доступ к инвестициям для реализации капиталоемких зеленых проектов, дороговизна заемных средств) на фоне слабости институтов контроля и экспертизы, достижение заявленных целей декарбонизации и перехода к «зеленой» энергетике, зафиксированных в соответствующих нормативных документах, существенно осложняется.

В свою очередь, вопросы финансирования сопряжены с проблемой дефицита кадров (более 4 тыс. чел), что подтверждено и результатами аудита Высшей аудиторской палаты Республики Казахстан (далее – ВАП РК), согласно которым зафиксировано отсутствие обновления кадров в энергетической отрасли, так как средний возраст работников составляет 50 лет. В разрезе специальностей, отрасль особо нуждается в ремонтном персонале на фоне недопустимо низкой заработной платы (86-97 тыс. тенге), что обуславливает отток специалистов в отрасли и страны, где оплата труда сравнительно выше. Так, эксперты отмечают, что если в смежных с энергетическим сектором отраслях установлены сравнительно высокие заработные платы, то это также повод для межотраслевого перетока специалистов (разница в оплате достигает 200 тыс. тенге). В этой связи, по информации Министерства энергетики Республики Казахстан (далее – МЭ РК), уже не первый год не удается повысить привлекательность профессий в области энергетики, несмотря на учет этого аспекта при смене тарифов и использовании грантов от ведущих институтов и организаций, работающих в отрасли [18].

В части регулирования процесса реализации проектов ВИЭ, которые ориентированы на достижение ЦУР 7, также имеются проблемные вопросы, связанные с привлечением инвестиций. Так, большинство проектов ВИЭ на сегодняшний день финансируются по линии международных организаций в иностранной валюте, что зачастую ведет к росту себестоимости проектов из-за колебаний курса иностранной валюты, а также дополнительных капитальных и операционных расходов на фоне роста инфляции [19]. При этом, несмотря на введенный механизм индексации тарифов, тариф остается неизменным после запуска проекта из-за задержки его реализации, существенно повышаются риски для инвесторов, и, снижается общий уровень инвестиционной привлекательности. Кроме того, сохраняется практика субсидирования тарифов на электроэнергию, произведенную традиционным способом (перевозка угля железными дорогами осуществляется по сниженным ставкам), в то время, как государственная поддержка экологичных ВИЭ более выгодна, в том числе и по цене в случае правильного регулирования данного процесса, так как имеющийся разрыв уже сокращается (сами тарифы на ВИЭ лишь немного выше, чем тарифы традиционных электростанций). Однако высокие затраты на подключение объектов ВИЭ существенно снижают их ценовую конкурентоспособность и эффективность, требуя дополнительных инвестиций. Усугубляет данную ситуацию асимметрия ответственности участников энергетического рынка, при которой одни участники строго соблюдают правила и платят за нарушения, другие – в обход обязательств и без последствий. В свою очередь, отсутствие устойчивого института контроля за реальными результатами заявленных крупных проектов в энергетике и рост скрытого (неучтенного) потребления энергии влияет на перманентный рост цен в энергетической отрасли.

В данной группе факторов нельзя не отметить необходимость совершенствования методологической стороны регуляторной практики мониторинга ЦУР 7. Так, например, действующий на национальном уровне индикатор 7.1.1. «Доля населения, имеющего доступ к электроэнергии» не учитывает качество обеспечения электроэнергией субъектов экономики. При этом частые перебои в подаче электричества отмечены в удаленных сельских населенных пунктах, в том числе ввиду стабильных климатических условий, слабой инженерной инфраструктуры и нехватки специалистов.

2. Технико-технологические факторы. Данная группа факторов отражает состояние действующей энергетической инфраструктуры, начиная от степени физического и морального износа производственных мощностей до наличия (или отсутствия) соответствующих технологий. В частности, степень износа электростанций, по мнению экспертов, колеблется на уровне

70-90 %, что усугубляет проблему дефицита балансирующих мощностей, ограниченности пропускной способности электрических сетей, в том числе вследствие большой протяженности территории Казахстана. Это влечет за собой технические потери электроэнергии и рост системных сбоев и создает угрозу для интеграции новых мощностей ВИЭ в единую энергетическую систему (далее – ЕЭС), обуславливая дефицит энергии в силу роста ее конечного потребления. При этом корневые причины неподготовленности общей электроэнергетической инфраструктуры к работе ВИЭ и их гармоничной интеграции в ЕЭС заключаются в зависимости объектов ВИЭ от климатических условий Казахстана и в отсутствии гибкого механизма их сочетания с традиционными источниками энергии. Это приводит к дисбалансу в системе производства и потребления энергии, так как частные провайдеры энергетического баланса формируют параллельный рынок со слабо регулируемыми контрактами и резким колебаниям нагрузки. Ослабление контроля и координации энергобаланса ограничивает синхронизацию с внешними энергосистемами.

В свою очередь, слабые темпы обновления основного оборудования и сетей в энергетической отрасли способствуют сохранению практики использования энерго-неэффективных производств, зданий и технологий, а устаревшие сети и системы учета энергии приводят к ее существенным потерям, что требует более активного использования информационных технологий в условиях перехода Казахстана к цифровой модели развития. Как показывает мировой опыт, более активное использование современных технологий в системе регулирования энергетического сектора, позволит решить актуальные вопросы обеспечения непрерывной подачи электричества, создания накопителей резервной энергии и предотвращения попутных потерь, в том числе за счет оцифровки приборов контроля распределительных сетей и балансировки всего спектра источников чистой энергии и биотоплива в структуре ЕЭС [20].

Анализ влияния совокупности факторов, которые ограничивают развитие энергетического сектора с учетом достижения существенного прогресса по достижению ЦУР 7, позволили определить приоритетные направления и выработать соответствующие рекомендации:

1. Укрепление инфраструктуры:

– Обеспечение гибкости электроэнергетической сети на основе формирования страхового механизма бесперебойной подачи электроэнергии со встроенными инструментами автоматического подключения резервных фондов и автоматической подстраховки стабильной подачи электроэнергии домохозяйствам, прежде всего, в удаленных сельских населенных пунктах.

– Ужесточение контроля за использованием бюджетных средств, используемых компаниями монополистами или олигополистическими структурами при модернизации устаревших объектов и оборудования в энергетическом секторе с целью сдерживания перманентного роста тарифов для населения.

– Совершенствование законодательной базы для установления конкурентных тарифов на электроэнергию. К примеру, введение углеродного налога и последовательное снижение квот на выбросы парниковых газов для традиционных электростанций, работающих на ископаемом топливе, позволит повысить тарифы для обычных газовых и угольных электростанций, что сделает тарифы ВИЭ более конкурентоспособными.

– Обеспечение стабилизации энергосистемы на основе внедрения системы накопления энергии, которые будут накапливать избыточную электроэнергию от ВИЭ, и, направлять ее в сеть в периоды пикового потребления. Параллельно следует предусмотреть наличие маневровых генерирующих мощностей на традиционных видах топлива, способных компенсировать временные колебания производства электроэнергии ВИЭ с условием применения чистых технологий.

– Совершенствование механизмов поддержки развития ВИЭ на основе внедрения в практику долгосрочных (не менее 15-20 лет) контрактов на покупку энергии с фиксированными ценами для более активного привлечения инвесторов. Кроме того, возможно применение опыта Китая по предоставлению налоговых преференций на само оборудование ВИЭ и на переработку отходов отработавших элементов. Рециклинг элементов ВИЭ обеспечит устойчивость всей цепочки создания стоимости, позволяя использовать переработанные материалы в производстве новых объектов, что сократит потребность в первичных ресурсах и снизит экологическую нагрузку, способствуя формированию более экологически чистой энергетической системы.

– Обеспечение локализации производства в сфере энергетического машиностроения, так как существует зависимость от импорта готового оборудования, стимулирующего импорт инфляции.

2. Энергосбережение:

– Повышение энергоэффективности зданий и сооружений через ужесточение законодательных требований к строительству зданий и сооружений, как жилых помещений, так и в секторе образования, здравоохранения, а также оказания социальных услуг, в том числе за счет внедрения национальных стандартов энергоэффективности.

– Выработать единый подход к управлению энергоэффективностью в стране, в первую очередь, на основе усиления межведомственной интеграции (прежде всего, энергетика, строительство, промышленность).

– Внедрение мотивационных механизмов, стимулирующих: 1) отказ от расточительной практики потребления энергоресурсов; 2) осознание важности энергосбережения и установления контроля над энергопотреблением; 3) формирование энергоэффективной практики.

3. Воспроизводство человеческого капитала:

– Повышение статуса профессии энергетика, которая сопряжена с риском для жизни, посредством существенного повышения заработной платы (прежде всего, ремонтного персонала) с учетом инфляционного обесценивания, а также обязательного предоставления полного социального пакета.

– Популяризация «зеленой» энергетики, в том числе на основе формирования комплексных программ обучения в системе высшего образования и подготовки специалистов по ВИЭ, что будет способствовать развитию возобновляемой энергетики в Казахстане.

– Необходимо расширить практику обучения специалистов как путем выдачи грантов на обучение, так и посредством подготовки и повышения квалификации специалистов в сфере системы энергоменеджмента.

4. Совершенствование методологии мониторинга ЦУР:

– В целях обеспечения качества мониторинга ЦУР 7, в части достижения индикатора 7.1, предлагается рассмотреть возможность введения дополнительных индикаторов: на национальном уровне – «Средняя продолжительность отключений электричества в год по стране, в мин.» и на региональном уровне – «Частота отключений электричества по региону, в часах» с целью более детального учета перебоев в подаче электроэнергии.

– В целях повышения качества оценки прогресса достижения ЦУР 7 и учитывая тот факт, что страна в среднесрочной перспективе будет продолжать использовать угольную генерацию с применением чистых технологий, целесообразно рассмотреть возможность применения таких вариантов национальных индикаторов, как: 1) «Доля производства очищенного угля от общего объема его выработки, в %»; 2) «Доля сельского населения, использующих очищенный уголь,% от их общего числа»; 3) «Доля ТЭЦ, использующих очищенный уголь, % от общего числа ТЭЦ, работающих на угле».

Выводы

Таким образом, анализ причинно-следственных связей, характеризующих современное развитие энергетического сектора Казахстана, показал, что международная оценка индекса ЦУР 7 справедлива в части стагнационного

тренда, так как решение задачи 7.1. «К 2030 году обеспечить всеобщий доступ к недорогому, надежному и современному энергоснабжению» в условиях развития современного Казахстана, обеспечено лишь в части доступа к энергоснабжению. При этом все еще не решенными остаются вопросы более активного применения современных чистых технологий по выработке недорогой и чистой энергии. Кроме того, полагаем, что ситуация замедленного тренда в решении задачи 7.2 «К 2030 году значительно увеличить долю энергии из возобновляемых источников в мировом энергетическом балансе» и задачи 7.3 «К 2030 году удвоить глобальный показатель повышения энергоэффективности» в среднесрочной перспективе сохранится. Основные причины такого прогноза обусловлены сохраняющей высокой долей энергоемкости промышленного сектора страны, исторической развитостью энергоемкого добывающего сектора и резко – континентальным климатом на фоне участившихся внешних вызовов и шоков. Вместе с тем, придать определенный импульс решению проблем, ограничивающих качественное развитие энергетического сектора страны возможно посредством применения комплексного подхода по реализации вышеуказанных приоритетных направлений и мер, а также укрепления межведомственной интеграции в области развития энергетического сектора с учетом глобальных обязательств Казахстана.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Токаев, К. К.** Выступление Главы государства на V Национальном Курултае // Официальный сайт Президента Республики Казахстан. [Электронный ресурс]. – https://www.akorda.kz/ru/vystuplenie-glavy-gosudarstva-kasym-zhomarta-tokaeva-na-v-zasedanii-nacionalnogo-kurultaya-200332

2 Стратегия «Казахстан – 2050»: новый политический курс состоявшегося государства. Послание Президента Республики Казахстан от 14 декабря 2012 года // Информационно-правовая система «Әділет». [Электронный ресурс]. – https://adilet.zan.kz/rus/docs/K1200002050

3 Закон Республики Казахстан «Об энергосбережении и повышении энергоэффективности от 13 января 2012 года № 541-IV (с изменениями от 17.07.2025 года) // Информационно-правовая система «Әділет». [Электронный ресурс]. – https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1200000541

4 Постановление Правительства Республики Казахстан «Об утверждении Концепции развития сферы энергосбережения и повышения энергоэффективности Республики Казахстан на 2023–2029 годы» от 28 марта 2023 года № 264 // Информационно-правовая система «Әділет». [Электронный ресурс]. – https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2300000264

5 Дорожная карта ЦУР 7 для Казахстана / Европейская экономическая комиссия ООН. [Электронный ресурс]. – URL: https://unece.org/sites/default/files/2025-04/SDG7%20Roadmap%20for%20Kazakhstan_Final_Rus_0.pdf

6 Постановление Правительства Республики Казахстан «Об утверждении Национального проекта «Модернизация энергетического и коммунального секторов» «1102 от 25 декабря 2024года. / Европейская экономическая комиссия ООН. [Электронный ресурс]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2400001102

7 Программа «Тариф в обмен на инвестиции» позволит снизить износ коммунальной инфраструктуры на 20% до 2029 года // Официальный информационный ресурс Премьер-министра Республики Казахстан. [Электронный ресурс]. – https://primeminister.kz/ru/news/programma-tarif-v-obmen-na-investitsii-pozvolit-snizit-iznos-kommunalnoy-infrastruktury-na-20-do-2029-goda-25322

8 Удельный вес сетей, нуждающихся в замене, в % к общей протяженности // Статистика энергетики / Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. [Электронный ресурс]. – https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-energy/

9 Конечное потребление // Статистика энергетики / Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. [Электронный ресурс]. – https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-energy/

10 **Дробны, Н.** Казахстан меняет правила игры: почему дешёвый газ тормозит развитие страны? / Н. Дробны // Orda.kz. [Электронный ресурс]. – URL: https://orda.kz/kazahstan-menjaet-pravila-igry-pochemu-deshevyj-gaz-tormozit-razvitie-strany-404889

11 **Байдрахман, А.** Казахстан почти удвоил импорт электроэнергии / А. Байдрахман // Azattyq Rýhy. [Электронный ресурс]. – https://rus.azattyq-ruhy.kz/economics/93864-kazakhstan-pochti-udvoil-import-elektroenergii-v-iiule

12 Экологическая и ресурсная производительность. Показатели «зеленой экономики» // Показатели «зеленой экономики» / Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. [Электронный ресурс]. – https://stat.gov.kz/ru/green-economy-indicators/195/

13 Об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года : Указ Президента Республики Казахстан

от 2 февраля 2023 года № 121 // Информационно-правовая система «Әділет». [Электронный ресурс]. – https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121

14 **Sillman, J., Hynynen, K., Dyukov I.** Emission reduction targets and electrification of the Finnish energy system with low-carbon power-to-X technologies: potentials, barriers, and innovations–A Delphi survey // Technological Forecasting and Social Change. – 2023. – Vol. 193. – Art. 122587. – https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122587

15 Топ-5 стран, которые вкладывают в ВИЭ больше всех. // POWEREXPO Almaty. – 2026. [Электронный ресурс]. – URL: https://powerexpo.kz/ru/press-tsentr-shymkent/otraslevye-novosti/789-top-5-stran-kotorye-vkladyvayut-v-vie-bolshe-vsekh

16 Sustainable Development Report 2025. – 2025. [Electronic resource]. – URL: https://s3.amazonaws.com/sustainabledevelopment.report/2025/sustainable-development-report-2025.pdf

17 Выбросы парниковых газов всех стран мира, Отчет ЕС за 2025. EDGAR. База данных выбросов для глобальных атмосферных исследований. [Электронный ресурс]. – https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2025?vis=co2pop#emissions_table

18 **Кенбаева, Г.** Три основные проблемы в энергетике Казахстана назвали в Минэнерго / Г. Кенбаева // Международное информационное агентство «Казинформ». [Электронный ресурс]. – URL: https://www.inform.kz/ru/tri-osnovnie-problemi-v-energetike-kazahstana-nazvali-v-minenergo-957195

19 Амбиции троекратного увеличения мощностей объектов возобновляемой энергетики к 2030 году / KPMG. – 2025. [Электронный ресурс]. – URL: https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/kz/pdf/2025/02/Ambition-to-triple-renewable-energy-capacity.pdf

20 **Stephen J., Lopes, J. D.** SDG7 and renewable energy consumption: The influence of energy sources // Technological Forecasting and Social Change. – 2024. – Vol. 198. – Art. 123004. –https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.123004

REFERENCES

1 **Tokaev, K. K.** Vystuplenie Glavy gosudarstva na V Nacional'nom Kurultae [Speech by the Head of State at the 5th National Kurultai] // Official website of the President of the Republic of Kazakhstan. [Electronic resource]. – https://www.akorda.kz/ru/vystuplenie-glavy-gosudarstva-kasym-zhomarta-tokaeva-na-v-zasedanii-nacionalnogo-kurultaya-200332

2 Strategiya «Kazahstan – 2050»: novyj politicheskij kurs sostoyavshegosya gosudarstva. Poslanie Prezidenta Respubliki Kazahstan ot 14 dekabrya 2012 goda

[The "Kazakhstan – 2050" Strategy: a New Political Course for a Mature State. Address of the President of the Republic of Kazakhstan dated December 14, 2012] // Information and Legal System "Әділет". [Electronic resource]. – https://adilet.zan.kz/rus/docs/K1200002050

3 Zakon Respubliki Kazahstan «Ob energosberezhenii i povyshenii energoeffektivnosti ot 13 yanvarya 2012 goda № 541-IV (s izmeneniyami ot 17.07.2025 goda) [The Law of the Republic of Kazakhstan "On Energy Saving and Improving Energy Efficiency" dated January 13, 2012, No. 541-IV (as amended on July 17, 2025)] // Information and Legal System "Adilet". [Electronic resource]. – https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1200000541

4 Postanovlenie Pravitel'stva Respubliki Kazahstan «Ob utverzhdenii Koncepcii razvitiya sfery energosberezheniya i povysheniya energoeffektivnosti Respubliki Kazahstan na 2023 – 2029 gody» ot 28 marta 2023 goda № 264 [Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan "On Approval of the Concept for the Development of the Energy Saving and Energy Efficiency Sector in the Republic of Kazakhstan for 2023–2029" dated March 28, 2023, No. 264] // Information and Legal System "Adilet". [Electronic resource]. – https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2300000264

5 Dorozhnaya karta CUR 7 dlya Kazahstana [SDG 7 Roadmap for Kazakhstan] / United Nations Economic Commission for Europe. [Electronic resource]. – URL: https://unece.org/sites/default/files/2025_04/SDG7%20Roadmap%20for%20Kazakhstan_Final_Rus_0.pdf

6 Postanovlenie Pravitel'stva Respubliki Kazahstan «Ob utverzhdenii Nacional'nogo proekta «Modernizaciya energeticheskogo i kommunal'nogo sektorov» «1102 ot 25 dekabrya 2024goda [Decree of the Government of the Republic of Kazakhstan "On the Approval of the National Project 'Modernization of the Energy and Utilities Sectors'" No. 1102, dated December 25, 2024] / United Nations Economic Commission for Europe. [Electronic resource]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2400001102

7 Oficial'nyj informacionnyj resurs Prem'er-ministra Respubliki Kazahstan. Programma «Tarif v obmen na investicii» pozvolit snizit' iznos kommunal'noj infrastruktury na 20 % do 2029 goda [The "Tariff in Exchange for Investments" program will reduce the wear and tear of utility infrastructure by 20 % by 2029] // Official information resource of the Prime Minister of the Republic of Kazakhstan. [Electronic resource]. – https://primeminister.kz/ru/news/programma-tarif-v-obmen-na-investitsii-pozvolit-snizit-iznos-kommunalnoy-infrastruktury-na-20-do-2029-goda-25322

8 Udel'nyj ves setej, nuzhdayushchihsya v zamene, v % k obshchej protyazhennosti [Percentage of Networks in Need of Replacement Relative to

Total Length] // Energy Statistics / National Statistics Bureau of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan. [Electronic resource]. – https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-energy/

9 Konechnoe potreblenie [Final Consumption] // Energy Statistics / National Statistics Bureau of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan. [Electronic resource]. – https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-energy/

10 **Drobny, N.** Kazahstan menyaet pravila igry: pochemu deshyovyj gaz tormozit razvitie strany? [Kazakhstan Is Changing the Rules of the Game: Why Is Cheap Gas Holding Back the Country's Development?] [Online] / N. Drobny // Orda.kz. [Electronic resource]. – URL: https://orda.kz/kazahstan-menjaet-pravila-igry-pochemu-deshevyj-gaz-tormozit-razvitie-strany-404889

11 **Bajdrahman, A.** Kazahstan pochti udvoil import elektroenergii [Kazakhstan Has Nearly Doubled Its Electricity Imports] [Online] / A. Baidrakhman // Azattyq Rýhy. [Electronic resource]. – https://rus.azattyq-ruhy.kz/economics/93864-kazakhstan-pochti-udvoil-import-elektroenergii-v-iiule

12 Ekologicheskaya i resursnaya proizvoditel'nost'. Pokazateli «zelenoj ekonomiki» [Environmental and Resource Productivity. "Green Economy" Indicators] // "Green Economy" Indicators / National Statistics Bureau of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan. [Electronic resource]. – https://stat.gov.kz/ru/green-economy-indicators/195/

13 Ukaz Prezidenta Respubliki Kazahstan «Ob utverzhdenii Strategii dostizheniya uglerodnoj nejtral'nosti Respubliki Kazahstan do 2060 goda» ot 2 fevralya 2023 goda № 121 [On the Approval of the Strategy for Achieving Carbon Neutrality in the Republic of Kazakhstan by 2060: Decree of the President of the Republic of Kazakhstan No. 121 of February 2, 2023] // "Adilet" Information and Legal System. [Electronic resource]. – https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121

14 **Sillman, J., Hynynen, K., Dyukov I.** Emission reduction targets and electrification of the Finnish energy system with low-carbon power-to-X technologies: potentials, barriers, and innovations–A Delphi survey // Technological Forecasting and Social Change. – 2023. – Vol. 193. – Art. 122587. – https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122587

15 Top-5 stran, kotorye vkladyvayut v VIE bol'she vsekh. [Top 5 countries investing the most in renewable energy] // POWEREXPO Almaty. – 2026. [Electronic resource]. – URL: https://powerexpo.kz/ru/press-tsentr-shymkent/otraslevye-novosti/789-top-5-stran-kotorye-vkladyvayut-v-vie-bolshe-vsekh

16 Sustainable Development Report 2025. – 2025. [Electronic resource]. – URL: https://s3.amazonaws.com/sustainabledevelopment.report/2025/sustainable-development-report-2025.pdf

17 Vybrosy parnikovyh gazov vsekh stran mira, Otchet ES za 2025. EDGAR. Baza dannyh vybrosov dlya global'nyh atmosfernyh [Greenhouse gas emissions from all countries worldwide, EU Report for 2025. EDGAR. Emissions database for global atmospheric research] issledovanij. [Electronic resource]. – https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2025?vis=co2pop#emissions_table

18 Kenbaeva, G. Tri osnovnye problemy v energetike Kazahstana nazvali v Minenergo [Ministry of Energy identifies three key challenges facing Kazakhstan's energy sector] / G. Kenbaeva // Kazinform International News Agency. [Electronic resource]. – URL:https://www.inform.kz/ru/tri-osnovnie-problemi-v-energetike-kazahstana-nazvali-v-minenergo-957195

19 Ambicii troekratnogo uvelicheniya moshchnostej ob"ektov vozobnovlyaemoj energetiki k 2030 god [Ambitions to triple the capacity of renewable energy facilities by 2030] / KPMG. – 2025. [Electronic resource]. – URL: https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/kz/pdf/2025/02/Ambition-to-triple-renewable-energy-capacity.pdf

20 **Stephen J., Lopes, J. D.** SDG7 and renewable energy consumption: The influence of energy sources // Technological Forecasting and Social Change. – 2024. – Vol. 198. – Art. 123004. – https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.123004

Поступило в редакцию 03.04.26.
Поступило с исправлениями 27.04.26.
Принято в печать 02.09.26.

Б. Хамбар[1], **А. М. Рахметова*[2]
[1,2]Экономикалық зерттеулер институты,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.
03.04.26 ж. баспаға түсті.
27.04.26 ж. түзетулерімен түсті.
02.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚАЗАҚСТАННЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ СЕКТОРЫ: ОРНЫҚТЫ ДАМУ МАҚСАТТАРЫНА ҚОЛ ЖЕТКІЗУДІҢ СЫН-ҚАТЕРЛЕРІ МЕН МҮМКІНДІКТЕРІ

Бұл мақалада орнықты даму мақсаттарына қол жеткізудегі прогресті өлшеу контекстінде Қазақстан Республикасының энергетикалық секторының даму үрдістерін талдау және бағалау нәтижелері келтірілген. Авторлар ұлттық деңгейде белгіленген индикаторларға қол жеткізуді шектейтін факторларды талдады

және қоршаған ортаны қорғаудың негізгі аспектілерімен өзара байланыстыра отырып, энергетика секторын дамытудың негізгі көрсеткіштері бөлінісінде халықаралық рейтингтердің көшбасшысы болып табылатын елдердің позицияларымен Қазақстанның позицияларын салыстырмалы бағалау келтірілді. Зерттеу қорытындысы бойынша авторлар бір – бірімен белгілі бір мүдделер қақтығысына түсе отырып, орнықты дамудың жетінші мақсатының ұлттық индикаторларының мәндеріне қол жеткізуді ғана емес, «Барлығы үшін арзан, сенімді, тұрақты және заманауи энергия көздеріне жалпыға бірдей қол жеткізуді қамтамасыз етуді» айтарлықтай шектейтін негізгі себеп-салдарлық байланыстарды анықтады, бірақ халықтың өмір сүру сапасына және тұтастай алғанда елдің әлеуметтік – экономикалық әл-ауқатына теріс әсер етеді. Осыған байланысты, мақаланың қорытынды бөлімінде авторлар энергетикалық менеджменттің тиімділігін арттыру негізінде, оның ішінде мемлекеттік басқару жүйесі деңгейінде туындайтын нарық сәтсіздіктерін жоюға бағытталған тәжірибеге бағытталған ұсынымдар кешенін ұсынды.

Кілтті сөздер: энергетикалық ресурстар, жаңартылатын энергия көздері, мемлекеттік басқару, тұрақты даму мақсаттары, шығарындыла.

*B. Khambar[1], *A.M. Rakhmetova[2]*
[1,2]Economic Research Institute,
Republic of Kazakhstan, Astana.
Received 03.04.26.
Received in revised form 27.04.26.
Accepted for publication 02.09.26.

KAZAKHSTAN'S ENERGY SECTOR: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES TO ACHIEVE THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

This article presents the results of an analysis and assessment of trends in the development of the energy sector of the Republic of Kazakhstan in the context of measuring progress towards achieving the Sustainable Development Goals. The authors analyze the factors limiting the achievement of indicators set at the national level and provide a comparative assessment of Kazakhstan's positions with those of countries that are leaders in international rankings in terms of key indicators of energy sector development in conjunction with key aspects of environmental protection. According to the results of the study, the authors identified the main cause–and-effect relationships, which, entering into a certain conflict of interests among themselves, significantly limit not only the achievement of the values of national indicators of the seventh Sustainable Development Goal "Ensuring universal access to affordable, reliable, sustainable and modern energy sources for all", but also They negatively affect the quality of life of the population and the socio – economic well-being of the country as a whole. In this regard, in the final part of the article, the authors present a set of practice-oriented recommendations aimed at eliminating emerging market failures by improving the efficiency of energy management, including at the level of the state management system.

Keywords: energy resources, renewable energy sources, public administration, sustainable development goals, emissions.

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ АҚПАРАТ

Абитаева Рахимаш Шанракбаевна, аға оқытушы, Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық Техникалық-Зерттеу университеті, Алматы қ., 050005, Қазақстан Республикасы, e-mail: r.abitayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-0431-9559

Абылкаиров Темирлан Манатович, «Электроэнергетика» мамандығы бойынша докторант, Энергетика және жасыл технологиялар институты, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: t.abylkairov@aues.kz, https://orcid.org/0009-0008-2523-8513

Азаматов Мурат Токтарбекович, «Автоматтандыру және басқару» мамандығы бойынша докторант, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: muratazamatov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-6956-0822

Айтмагамбетова Гульмира Аскербеккызы, «Жылуэнергетика» мамандығы бойынша докторант, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: gul_2904@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7934-9990

Айтуарова Мөлдір Тұралықызы, «Электр энергетикасы» мамандығының магистранты, Машина жасау, энергетика және ақпараттық технологиялар факультеті, Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, Қостанай қ., 110000, Қазақстан Республикасы, e-mail: aitumold@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-3729-0596

Ақаев Айбек Мұратбекұлы, PhD, мектеп деканы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: aybek.akaev.vko_81@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9390-5703

Әкімбек Гүлмира Әбілқайыркызы, PhD, доцент м.а., Жылу энергетика кафедрасы, Көлік-энергетика факультеті, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 10000, Қазақстан Республикасы, e-mail: akimbekg@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7773-6479

Алимгазин Алтай Шурумбаевич, «Жылуэнергетика» кафедрасының профессор м.а., Көлік-энергетика факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: alimgazin_altai@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5848-1842

Алияров Бирлесбек Қаниевич, техника ғылымдарының докторы, «Жылу энергетикасы» кафедрасының профессоры, Энергетика және жасыл технологиялар институты, Ғ. Даукеев атындағы Алматы энергетика және

байланыс университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: aliyarov_b@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8612-6779

Апсеметова Айжан Туретаевна, «Электрэнергетика» білім беру бағдарламасы бойынша докторант, Ақпараттық технологиялар және энергетика жоғары мектебі, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., 160012, Қазақстан Республикасы, e-mail: aaizgan@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-0515-6648

Арипова Назгуль Михайловна, PhD докторы, «Жылуэнергетика» кафедрасының доценті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: nazgul_2010@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2760-8617

Арыстанбаев Құттыбек Есенгелдыұлы, техника ғылымдарының кандидаты, «Фармацевтикалық өндіріс технологиясы» кафедрасының доценті, Оңтүстік Қазақстан медицина академиясы, Шымкент қ., 160001, Қазақстан Республикасы, e-mail: 201ukgu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9499-192X

Аубакирова Алия Муратовна, «Компьютерлік ғылымдар» білім беру бағдарламасының докторанты, Бағдарламалық инженерия мектебі, «Индустрия 4.0» ғылыми-инновациялық орталығы, Astana IT University, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Aliya.Aubakirova@astanait.edu.kz, https://orcid.org/0009-0004-6925-6714

Әмір Бақыт Тілеулесұлы, техникалық ғылымдар кандидаты, Физика-техникалық факультеті, Жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: Bakyt.Amir@kaznu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0003-9347-8379

Әрпіш Айбар Әлімбайұлы, докторант, техника ғылымдарының магистранты, Қ. И. Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: aibar201329@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-3368-6081

Бабахан Шохрух Абдилкасымович, аға оқытушы, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., 161200, Қазақстан Республикасы, e-mail: babakhan.shokhrukh@ayu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7723-0045

Баимбетов Нурлан Абишович, техника ғылымдарының кандидаты, «Электрэнергетикасы» кафедрасының аға оқытушысы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010001, Қазақстан Республикасы, e-mail: nb.s.78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0990-8731

Байниязов Бақтыбек Әскеруұлы, техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Энергетика институты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: b.bayniyazov@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-1103-2329

Барукин Александр Сергеевич, PhD, профессор, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: alexbarukin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5969-4030

Баянова Айгерим Каиргельдиновна, Жылуэнергетика кафедрасының оқытушысы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: bayanovaak1@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-7476-529X

Бекбаев Амангельды, техника ғылымдарының докторы, профессор, Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық Техникалық-Зерттеу университеті, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.bekbayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-3520-1710

Бекболатова Жаннат Кайыровна, PhD, қауымд. профессор, Энергетика факультеті, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Zh.Bekbolatova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-8219-6400

Бекенов Тасыбек Нусупбекұлы, техника ғылымдарының докторы, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасының профессоры, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010012, Қазақстан Республикасы, e-mail: bekbken@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0188-822X

Бектасова Асемгуль Айтпаевна, техникалық ғылымдар магистрі, аға оқытушы, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: bektasova_aa@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-8888-8894

Бектібай Біржан Жапсарбекұлы, техника ғылымдары кандидаты, Физика-техникалық факультеті, Жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: bektibaybirzhan@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6411-8049

Бектимиров Анур Талгатович, PhD, қауымд. профессор, Энергетика және жасыл технологиялар институты, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, «R&D Power Grid Automation» ЖШС директоры, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.bektimirov@aues.kz, https://orcid.org/0000-0001-5609-6206

Бейсенбі Мамырбек Аукебайұлы, техника ғылымдарының докторы, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасының профессоры, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010012, Қазақстан Республикасы, e-mail: beisenbi@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2109-4512

Белощицкий Андрей Александрович, техника ғылымдарының докторы, профессор, ғылым және инновациялар жөніндегі проректор, Astana IT University, Астана, 010000, Қазақстан Республикасы, Ақпараттық технологиялар кафедрасы, Киев ұлттық құрылыс және сәулет университеті, Киев қ., 03680, Украина, e-mail: bao1978@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9548-1959

Бергузинов Асхат Нурланович, PhD, профессор, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: askhat_berguzinov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6954-8259

Воронков Владимир Владимирович, «Органикалық заттардың химиялық технология» мамандығы бойынша магистратура студенті, Жаратылыстану ғылымдары факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: volodya.voronkov.00@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-4645-2884

Габдулов Асет Уральбаевич, Жылуэнергетика кафедрасының докторанты, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: gabdulov25@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-3266-8270

Ғабыл-Манапова Фариза Асхатқызы, «Электр энергетикасы» мамандығы бойынша докторант, Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық Техникалық-Зерттеу университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: fariza2909@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-1281-1302

Гончаренко Татьяна Андреевна, технология ғылымдарының докторы, профессор, Ақпараттық технологиялар кафедрасы, Киев ұлттық құрылыс және сәулет университеті, Киев қ., 03680, Украина, e-mail: goncharenko.ta@knuba.edu.ua, https://orcid.org/0000-0003-2577-6916

Даутов Сухраб Срапулұлы, сениор-лектор, АЛТ университеті, Энергетика кафедрасының сениор-лекторы, «Қазақ техникалық даму институты» ЖШС жобалау және зерттеу жұмыстары директоры, Алматы қ., 050010, Қазақстан, e-mail: sukhrab_dautov@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-2135-0790

Демесова Сәуле Талғатқызы, PhD, Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы қ., 050010, Қазақстан Республикасы, e-mail: saule.demesova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-9224-6460

Динмуханбетова Айгуль Жумагельдыевна, PhD, қауымд. профессор, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: ardi100909@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-4538-9672

Добренко Максим Александрович, магистрант, Энергетика факультеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: maksimka.dobrenko@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-3348-9503

Ерғалиев Азамат Бағдатұлы, техникалық ғылымдар магистрі, оқытушы-ассистент, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: yergaliyev10@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-1315-2615

Ерқоңыр Әсел Күнтуғанқызы, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Электр энергетика және еңбек қорғау» кафедрасы, Ө. А. Байқоңыров атындағы Жезқазған университеті, Жезқазған қ., 100600, Қазақстан Республикасы, e-mail: aselkuntuganovna@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-3296-976X

Еруланова Айжан Ерулановна, PhD, Энергетика институты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 020000, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.erulanova@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-8429-8507

Есмаханова Лаура Нурлановна, PhD, «Автоматтандыру және телекоммуникация» кафедрасы, Технологиялық факультет, М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз қ., 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: laura060780@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3308-9676

Жакишев Бауыржан Айтмукашевич, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Электр энергетикасы» кафедрасының доценті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010001, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhakishev_ba@enu.kz, https://orcid.org/0009-0006-4642-6818

Жалмағамбетова Ұлтуар Қайырболатқызы, PhD, «Жылуэнергетика» кафедрасының профессоры, Энергетика факультеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: ultuara@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2261-2222

Жантілесова Әсемгүл Бейсембайқызы, PhD, қауымд. профессор м.а., доцент, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010008, Қазақстан Республикасы, e-mail: acbizh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3730-0579

Жармағамбетова Меруерт Советовна, техника ғылымының кандидаты, ректор, ВАК доценті, Энергетика кафедрасы, АЛТ университеті, Алматы қ., 050012, Қазақстан, e-mail: rector@alt.edu.kz, https://orcid.org/0009-0008-3355-8293

Жумалиева Алтынай Қаирбеккызы, техникалық ғылымдар магистрі, «Жылу энергетикасы» білім беру бағдарламалар тобының аға оқытушысы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhumaliyeva1990@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-0342-1869

Ибрагимова Светлана Викторовна, техника ғылымдарының кандидаты, профессордың ассистенті, Машина жасау, энергетика және ақпараттық технологиялар факультеті, Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, Қостанай қ., 110000, Қазақстан Республикасы, e-mail: ibragimovasvetlana75@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-2798-9149

Исабеков Жанат Бейсембайұлы, PhD, қауымд. профессор, доцент, «Электротехника және автоматтандыру» кафедрасының меңгерушісі, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: zh_is@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3980-1617

Исабекова Бибігүл Бейсембайқызы, PhD, қауымд. профессор, доцент, Computer Science факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: asbizh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5044-3211

Исатаев Мұхтар Советұлы, физика-математика ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, Физика-техникалық факультеті, Жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: muhtar.isataev@kaznu.kz, https://orcid.org/0000-0001-8248-670X

Искаков Какизат Такуадинович, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан, e-mail: kazizat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3872-4026

Ишангалиева Арайлым Фазыловна, мұғалім, М-С. Бабажанов атындағы жалпы орта білім беретін мектебі, Батыс Қазақстан, 090200, Қазақстан Республикасы, e-mail: araika0177@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-3719-7908

Каверин Владимир Викторович, техника ғылымдарының кандидаты, профессор м.а., өндірістік процестерді автоматтандыру, электрэнергетика, Энергетика, автоматика және телебайланыс факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012/M00A1T8, Қазақстан Республикасы, e-mail: v.kaverin@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2021-7445

Калтаев Абдулла Габдылманапулы, PhD, қауымд. профессор, доцент, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: abdulla911@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1684-3347

Кангожин Бекмухамбет Рашитұлы, профессор, Энергетика кафедрасының профессоры, «Қазақ техникалық даму институты» ЖШС

бас директоры, АЛТ университеті, Алматы қ., 050010, Қазақстан, e-mail: almaty_bek@inbox.ru, https://orcid.org/0009-0000-1023-9873

Каримолданова Маржан Адилбекқызы, «Жылу энергетикасы» мамандығы бойынша докторант, Энергетика және жасыл технологиялар институты, F. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: m.karimoldanova@aues.kz, https://orcid.org/0009-0009-6762-7901

Карманов Амангельды Ерболович, PhD, «Жылуэнергетика» кафедрасының профессоры, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: aman270685@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7512-0275

Катранова Ғазиза Серікқызы, PhD, Phoenix International Resources Caspian ЖШС HR мамандағы, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: gaziza.katranova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0688-5324

Килибаев Еркебулан Омирлиевич, техника ғылымдарының кандидаты, «Стандарттау, сертификаттау және метрология» кафедрасының доцент м.а., Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010001, Қазақстан Республикасы, e-mail: 1k.e.o_77@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1847-4824

Кирий Павел Викторович, «Электр энергетикасы» мамандығының магистранты, Машина жасау, энергетика және ақпараттық технологиялар факультеті, Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, Қостанай қ., 110000, Қазақстан Республикасы, e-mail: studp4vsh4rk@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-9462-9139

Кокаев Умиржан Шералиевич, техника ғылымдарының кандидаты, Көлік-энергетика факультетінің деканы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010001, Қазақстан Республикасы, e-mail: kokayev_ush@enu.kz, https://orcid.org/0009-0001-3636-8435

Копышева Асия Кажыгалиевна, «Жылуэнергетика» кафедрасының 3 курс докторанты, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Assiya-901405@yandex.kz, https://orcid.org/0009-0007-1227-9810

Корамбаев Данат Рустемович, магистрант, Энергетика факультеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: danat.korambaev@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-8355-3562

Қазамбаев Ильяс Маратұлы, «Техникалық жүйелерді басқару» мамандығы бойынша докторант, Энергетика институты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, «Industry 4.0» ҒЗО уақытша директорының м.а., Astana IT University, Астана қ., 010000,

Қазақстан Республикасы, e-mail: ilyaskazambayev@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0850-7490

Қалқабаева Гүлмира Өркенқызы, «Language education» кафедрасының сениор-лекторы, Мұхамеджан Тынышпаев атындағы АЛТ Университеті, Алматы қ., 050012, Қазақстан Республикасы, e-mail: g.kalkabaeva@alt.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-8311-5660

Қылышқожа Нұрай Нұркожақызы, «Аэроғарыштық инженерия» мамандығы бойынша магистр, Падова университеті, Падова, Венето қ., 35122, Италия Республикасы, e-mail: nkylyshkozha@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-4340-178X

Кунтубаева Жайна Ғаниқызы, бакалавр, Физика-техникалық факультеті, Жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: Zhaina.Kuntubayeva@kaznu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0001-8010-9510

Лаврентьев Алексей Владимирович, «Компьютерлік лингвистика» кафедрасының оқытушысы, Н. Исанов атындағы ҚМҚСА, Бішкек қ., Қырғыз Республикасы, e-mail: teolidz@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-6884-8980

Мәди Перизат Шаймуратқызы, қауымд. профессор м.а., «Электротехника және автоматтандыру» білім беру бағдарламалар тобы, Энергетика институты, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: p.madi@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-5930-8112

Машрапов Бауыржан Ерболович, PhD, қауымд.профессор, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: bokamashrapov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3018-4125

Меирбекова Оксана Даировна, аға оқытушы, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., 161200, Қазақстан Республикасы, e-mail: oksana_120183@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0949-1443

Мерғалиев Нұрболат Тасболатұлы, «QazaqGaz Aimaq» АҚ Астана өндірістік филиалының өндірістік-техникалық бөлімінің бастығы, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nmergaliev@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-7101-775X

Мерзадинова Гульнара Тынышбаевна, техника ғылымдарының докторы, практик-профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: gera.62@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2799-7026

Мехтиев Али Джаванширович, техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Энергетика институты, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, ғылым және инновациялар жөніндегі проректор, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: barton.kz@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2633-3976

Минажова Саулеш Аманбаевна, PhD, ғылыми қызметкер, «QazNRG Group» ЖШС, Алматы қ., 050060, Қазақстан Республикасы, e-mail: s.minazhova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-5461-2251

Миргородский Сергей Иванович, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: serg.mirg@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0009-5106-3574

Молдыбаева Нургул Искаккызы, PhD, аға оқытушы, «Энергетика және электротехника» кафедрасы, «Инженерлік технологиялар» факультеті, Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы қ., 050010, Қазақстан Республикасы, e-mail: moldybayeva78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5016-8800

Мустафина Раиса Мухаметжаровна, профессор, техникалық ғылымдар кандидаты, доцент, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: mustafina_rm@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-8739-7377

Налибаев Отабек Шакирович, «Электр энергетикасы және еңбекті қорғау» кафедрасының магистранты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.nalibayev@alageum.com, https://orcid.org/0009-0007-5826-6003

Нефтисов Александр Витальевич, PhD, қауымд.профессор, Academy of Physical Education and Mass Sports, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: shurik-neftisov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4079-2025

Никифоров Александр Степанович, техника ғылымдарының докторы, «Жылуэнергетика» кафедрасының профессоры, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: aleke4599@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6977-0957

Нүркен Сәкенұлы Қыдыров, электрэнергетика мамандығы бойынша докторант, Өндірістік процестерді автоматтандыру, Энергетика, автоматика және телебайланыс факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012/M00A1T8, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurken.kydyrov20@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-8732-3775

Обозов Алайбек Джумабекович, техника ғылымдарының докторы, профессор, Қырғыз Республикасы Ұлттық ғылым академиясының корреспондент-мүшесі, жаңартылатын энергия көздері зертханасының меңгерушісі, Бішкек қ., 720055, Қырғыз Республикасы, e-mail: alaibek.obozov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7854-5831

Омар Даурен Рашитұлы, PhD, «Агроинженерия» ғылыми-өндірістік орталығы, «Энергия үнемдеу және жасыл энергия» зертхана меңгерушісі, Ғ.Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, кіші ғылыми қызметкер, Алматы қ., 050005, Қазақстан Республикасы, e-mail: omardauren@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7857-0316

Омаров Рашит Әбдіғаравұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, «Агроинженерия» ғылыми-өндірістік орталығы, Ғ.Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050005, Қазақстан Республикасы, e-mail: omarov-rashin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9961-7657

Оразбай Мұхтар Нұрболұлы, «Индустрия 4.0» ғылыми-инновациялық орталығы, Astana IT University, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: m.orazbay@astanait.edu.kz, https://orcid.org/0009-0001-4994-6484

Ордабаев Батырбек Ерболатович, «Электротехника және автоматтандыру» мамандығы бойынша докторант, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: inzhener.kipgnps@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-5457-3490

Орман Индира Мәлікқызы, «Информатика, есептеуіш техника және менеджмент» мамандығының докторанты, М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл қ., 010000, Қазақстан, e-mail: Indira.malikovna@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-8072-4996

Плевако Анжела Петровна, Жылуэнергетика кафедрасының аға оқытушысы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: plada78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3080-5531

Починок Сергей Федорович, И. Раззаков атындағы Қырғыз мемлекеттік техникалық университеті, Бішкек қ., 720044, Қырғыз Республикасы, e-mail: info@incomcompany.kz, https://orcid.org/0009-0006-2262-2283

Раделюк Иван Михайлович, PhD, қауымд. профессор, доцент, Жаратылыстану ғылымдары факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: drivanradelyuk@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6067-3034

Рахметова Айбота Мұратқызы, экономика ғылымдарының докторы, профессор, Экономикалық зерттеулер институтының Тұрақты даму мақсаттары жөніндегі хатшылығы, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Aibota@mail.kz, https://orcid.org/0000-0002-8741-0373

Ромадин Алексей Юрьевич, «Ұлттық сараптау және сертификаттау орталығы» АҚ Павлодар филиалының сарапшысы, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Me_kom@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-9514-4187

Рустамов Насим Тулегенович, техника ғылымдарының докторы, аға оқытушы, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., 161200, Қазақстан Республикасы, e-mail: nasim52@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6437-6600

Сағындық Әйгерім Бекенқызы, қауымд. профессор, доцент, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: aiko_.90@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0376-2150

Саракешова Нұрбүбі Нұркенқызы, PhD, «Жылу энергетикасы» білім беру бағдарламалар тобының жетекшісі, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: n.sarakeshova@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0007-9362-7740

Сатенова Мадина Бақтыбекқызы, сениор-лектор, 1-курс докторанты, Энергетика кафедрасы, АЛТ университеті, Алматы қ., 050012, Қазақстан Республикасы, e-mail: msb_madeka@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-5778-2536

Сәрсенбаев Ерлан Алиасқарұлы, PhD, қауымд. профессор, «Электр энергетикасы және еңбекті қорғау» кафедрасы, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: y.sarsenbayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-8887-1171

Сейдулла Жәнібек Қанатбекұлы, PhD, Физика-техникалық факультеті, Жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: Zhanibek.seidulla@kaznu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0413-6557

Старчеус Александр Николаевич, 7M07102 «Электр энергетикасы» білім беру бағдарламасының 2-курс магистранты, Энергетика және ақпараттық жүйелер жоғары мектебі, Рудный индустриялық университеті, Рудный қ., 111500, Қазақстан Республикасы, e-mail: srewqas86@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-1073-3822

Сулейменова Гүлмира Оразбайқызы, «Электротехникалық кешендер және жүйелер» бойынша докторант, Энергетика институты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: suleymenovago@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-1404-5095

Төлеубеков Еділ Қайратұлы, электроэнергетика магистрі, оқытушы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: edilinho@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-4024-1151

Тулебаева Гулдана Анапияевна, оқытушы, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., 161200, Қазақстан Республикасы, e-mail: dana86_01@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-8886-6381

Түтебаева Ғалия Муафеккызы, техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, доцент, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: galiatyutebayeva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3503-2569

Уахитова Айгуль Ботанқызы, техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, доцент, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.uakhitova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6317-8178

Умурзакова Анара Даукеновна, PhD, Энергетика институты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 020000, Қазақстан Республикасы, e-mail: granat_72@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7683-5256

Үмбетов Ерік Серікқалиұлы, техника ғылымдарының кандидаты, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: erumbetov64@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6645-3489

Хажин Ильгиз Азаматович, магистрант, Энергетика факультеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: ihazhin7@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-5067-607X

Хамбар Бақытгүл, экономика ғылымдарының кандидаты, Экономикалық зерттеулер институтының Тұрақты даму мақсаттары жөніндегі хатшылығы, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: 237809@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5075-3842

Чимкентбаева Роза Макашевна, «Электрэнергетика» білім беру бағдарламасы бойынша докторант, Ақпараттық технологиялар және энергетика жоғары мектебі, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан

университеті, Шымкент қ., 160012, Қазақстан Республикасы, e-mail: Roza-0515@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-3124-6051

Шамкен Нұр-Астан Болатұлы, PhD, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010012, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurastan98@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-3080-2399

Шимпф Алексей Андреевич, ассистент-оқытушы, «Электротехника және автоматтандыру» кафедрасы, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: shimpf5329@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4203-9117

Шопаева Айман Амановна, «Жылуэнергетика» мамандығы бойынша докторант, Көлік-энергетика факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: aisham.expert@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-9338-1911

Шыныбай Жандос Сапарғалиұлы, PhD, Энергетика кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: z.shynybay@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-9310-0339

Юрченко Алексей Васильевич, техника ғылымдарының докторы, электроэнергетика профессоры, Жоғары энергетикалық үдерістер физикасы бойынша ғылыми-зерттеу мектебі, Томск политехникалық университеті, Томск қ., 634050, Ресей Федерациясы, e-mail: reaper@tpu.ru, https://orcid.org/0000-0002-7854-5495

Ярославцев Михаил Викторович, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: myaroslavtsev@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4666-1296

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абитаева Рахимаш Шанракбаевна, ст. преподаватель, Казахский Национальный Исследовательский Технический университет имени К. Сатпаева, г. Алматы, 050005, Республика Казахстан, e-mail: r.abitayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-0431-9559

Абылкаиров Темирлан Манатович, докторант по специальности «Электроэнергетика», Институт энергетики и зеленых технологий, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: t.abylkairov@aues.kz, https://orcid.org/0009-0008-2523-8513

Азаматов Мурат Токтарбекович, докторант «Автоматизация и управление», факультет энергетики, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: muratazamatov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-6956-0822

Айтмагамбетова Гульмира Аскербеккызы, докторант по специальности «Теплоэнергетика», факультет энергетики, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: gul_2904@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7934-9990

Айтуарова Молдир Туралыевна, магистрант ОП 7М07101 «Электроэнергетика», факультет машиностроения, энергетики и информационных технологий, Костанайский региональный университет имени А. Байтұрсынұлы, г. Костанай, 110000, Республика Казахстан, e-mail: aitumold@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-3729-0596

Акаев Айбек Муратбекович, PhD, декан школы, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: aybek.akaev.vko_81@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9390-5703

Әкімбек Гүлмира Әбілқайркызы, PhD, и.о. доцента, кафедра «Теплоэнергетика», Транспортно-энергетический факультет, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 10000, Республика Казахстан, e-mail: akimbekg@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7773-6479

Алимгазин Алтай Шурумбаевич, и.о. профессора кафедры «Теплоэнергетика», Транспортно-энергетический факультет, Евразийский Национальный Университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: alimgazin_altai@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5848-1842

Алияров Бирлесбек Каниевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика», Институт энергетики и зеленых технологий, Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: aliyarov_b@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8612-6779

Амир Бахыт Тлеулесович, кандидат технических наук, Физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: Bakyt.Amir@kaznu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0003-9347-8379

Апсеметова Айжан Туретаевна, докторант образовательной программы «Электроэнергетика», Высшая школа «Информационные технологии и энергетика», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, 160012, Республика Казахстан, e-mail: aaizgan@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-0515-6648

Арипова Назгуль Михайловна, PhD, ассоц. профессор кафедры «Теплоэнергетика», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140003, Республика Казахстан, e-mail: nazgul_2010@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2760-8617

Арпиш Айбар Алимбайулы, докторант, магистр технических наук, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: aibar201329@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-3368-6081

Арыстанбаев Куттыбек Есенгельдыевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология фармацевтического производства», Южно-Казахстанская медицинская академия, г. Шымкент, 160001, Республика Казахстан, e-mail: 201ukgu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9499-192X

Аубакирова Алия Муратовна, докторант образовательной программы «Компьютерные науки», Школа программной инженерии, Научно-инновационный центр «Индустрия 4.0», Astana IT University, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: Aliya.Aubakirova@astanait.edu.kz, https://orcid.org/0009-0004-6925-6714

Бабахан Шохрух Абдилкасымович, ст. преподаватель, Международный казахско-турецкий университет имени Хожди Ахмеда Ясави, г. Туркестан, 161200, Республика Казахстан, e-mail: babakhan.shokhrukh@ayu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7723-0045

Баимбетов Нурлан Абишович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика», Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010001, Республика Казахстан, e-mail: nb.s.78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0990-8731

Байниязов Бахтыбек Аскерович, кандидат технических наук, ассоц. профессор, Институт энергетики, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: b.bayniyazov@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-1103-2329

Барукин Александр Сергеевич, PhD, профессор, факультет энергетики, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: alexbarukin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5969-4030

Баянова Айгерим Каиргельдиновна, преподаватель кафедры «Теплоэнергетика», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140003, Республика Казахстан, e-mail: bayanovaak1@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-7476-529X

Бекбаев Амангельды, доктор технических наук, профессор, Казахский Национальный Исследовательский Технический университет имени К. Сатпаева, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: a.bekbayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-3520-1710

Бекболатова Жаннат Кайыровна, PhD, ассоц. профессор, факультет энергетики, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: Zh.Bekbolatova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-8219-6400

Бекенов Тасыбек Нусупбекович, доктор технических наук, профессор кафедры «Системного анализа и управления», Евразийский Национальный Университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, 010012, Республика Казахстан, e-mail: bekbken@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0188-822X

Бектасова Асемгуль Айтпаевна, магистр технических наук, ст. преподаватель, факультет энергетики, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: bektasova_aa@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-8888-8894

Бектибай Биржан Жапсарбекович, кандидат технических наук, Физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: bektibaybirzhan@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6411-8049

Бектимиров Анур Талгатович, PhD, ассоц. профессор, Институт энергетики и зеленых технологий, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, директор ТОО «R&D Power Grid Automation», г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: a.bektimirov@aues.kz, https://orcid.org/0000-0001-5609-6206

Бейсенби Мамырбек Аукебаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Системного анализа и управления», Евразийский Национальный Университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, 010012, Республика Казахстан, e-mail: beisenbi@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2109-4512

Белощицкий Андрей Александрович, доктор технических наук, профессор, проректор по науке и инновациям, Astana IT University, Астана, 010000, Республика Казахстан, кафедра информационных технологий, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, 03680, Украина, e-mail: bao1978@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9548-1959

Бергузинов Асхат Нурланович, PhD, профессор, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: askhat_berguzinov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6954-8259

Воронков Владимир Владимирович, магистрант по специальности «Химическая технология органических веществ», факультет естественных наук, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: volodya.voronkov.00@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-4645-2884

Габдулов Асет Уральбаевич, докторант кафедры «Теплоэнергетика», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140003, Республика Казахстан, e-mail: gabdulov25@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-3266-8270

Габыл-Манапова Фариза Асхаткызы, докторант по специальности «Электроэнергетика», Казахский Национальный Исследовательский Технический университет имени К. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: fariza2909@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-1281-1302

Гончаренко Татьяна Андреевна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой информационных технологий, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, 03680, Украина, e-mail: goncharenko.ta@knuba.edu.ua, https://orcid.org/0000-0003-2577-6916

Даутов Сухраб Срапулович, сениор-лектор кафедры энергетики, Университет ALT, директор ТОО «Казахский институт технического развития», г. Алматы, 050010, Казахстан, e-mail: sukhrab_dautov@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-2135-0790

Демесова Сәуле Талғатқызы, PhD, Казахский Национальный Аграрный Исследовательский Университет, г. Алматы, 050010, Республика Казахстан, e-mail: saule.demesova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-9224-6460

Динмуханбетова Айгуль Жумагельдыевна, доктор PhD, ассоц. профессор, факультет энергетики, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: ardi100909@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-4538-9672

Добренко Максим Александрович, магистрант, факультет энергетики, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: maksimka.dobrenko@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-3348-9503

Ергалиев Азамат Багдатович, магистр технических наук, преподаватель-ассистент, факультет энергетики, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: yergaliyev10@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-1315-2615

Ерқоңыр Әсел Күнтуғанқызы, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и охрана труда», АО «Жезказганский университет имени О. А. Байконурова», г. Жезказган, 100600, Республика Казахстан, e-mail: aselkuntuganovna@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-3296-976X

Еруланова Айжан Ерулановна, PhD, Институт энергетики, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 020000, Республика Казахстан, e-mail: a.erulanova@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-8429-8507

Есмаханова Лаура Нурлановна, PhD кафедры «Автоматизация и телекоммуникация», Технологический факультет, Таразский университет имени М. Х. Дулати, г. Тараз, 080000, Республика Казахстан, e-mail: laura060780@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3308-9676

Жакишев Бауыржан Айтмукашевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, 010001, Республика Казахстан, e-mail: zhakishev_ba@enu.kz, https://orcid.org/0009-0006-4642-6818

Жалмагамбетова Ултуар Каирбулатовна, PhD, профессор кафедры «Теплоэнергетика», факультет энергетики, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: ultuara@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2261-2222

Жантлесова Асемгуль Бейсембаевна, PhD, и.о. ассоц.профессора, доцент, Казахский государственный университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010008, Республика Казахстан, e-mail: acbizh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3730-0579

Жармагамбетова Меруерт Советовна, кандидат технических наук, доцент ВАК кафедры энергетики, ректор, Университет ALT, г. Алматы, 050012, Казахстан, e-mail: rector@alt.edu.kz, https://orcid.org/0009-0008-3355-8293

Жумалиева Алтынай Каирбековна, магистр технических наук, старший преподаватель Группы образовательных программ «Теплоэнергетика», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: zhumaliyeva1990@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-0342-1869

Ибрагимова Светлана Викторовна, кандидат технических наук, ассистент профессора, факультет машиностроения, энергетики и информационных технологий, Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы, г. Костанай, 110000, Республика Казахстан, e-mail: ibragimovasvetlana75@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-2798-9149

Исабеков Жанат Бейсембайевич, PhD, ассоц. профессор, доцент, заведующий кафедрой «Электротехники и Автоматизации», факультет энергетики, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: zh_is@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3980-1617

Исабекова Бибигуль Бейсембаевна, PhD, ассоц. профессор, доцент, факультет Computer Science, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: asbizh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5044-3211

Исатаев Мухтар Советович, кандидат физико-математических наук, ассоциированный профессор, Физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: muhtar.isataev@kaznu.kz, https://orcid.org/0000-0001-8248-670X

Искаков Какизат Такуадинович, доктор физико-математических наук, профессор, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Казахстан, e-mail: kazizat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3872-4026

Ишангалиева Арайлым Фазыловна, учительница, Средняя общеобразовательная школа имени М-С. Бабажанова, Западный Казахстан, 090200, Республика Казахстан, e-mail: araika0177@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-3719-7908

Каверин Владимир Викторович, кандидат технических наук, и.о. профессора, электроэнергетика, Автоматизация производственных процессов, факультет энергетики, автоматики и телекоммуникаций, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012/M00A1T8, Республика Казахстан, e-mail: v.kaverin@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2021-7445

Казамбаев Ильяс Маратулы, докторант по специальности «Управление техническими системами», Институт энергетики, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, и.о. директора НИЦ «Industry 4.0», Astana IT University, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: ilyaskazambayev@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0850-7490

Калкабаева Гулмира Уркеновна, сениор-лектор кафедры «Language education», ALT Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, г. Алматы, 050012, Республика Казахстан, e-mail: g.kalkabaeva@alt.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-8311-5660

Калтаев Абдулла Габдылманапулы, PhD, ассоц. профессор, доцент, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: abdulla911@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1684-3347

Кангожин Бекмухамбет Рашитович, профессор кафедры энергетики, Университет ALT, генеральный директор ТОО «Казахский институт технического развития», г. Алматы, 050010, Казахстан, e-mail: almaty_bek@inbox.ru, https://orcid.org/0009-0000-1023-9873

Каримолданова Маржан Адилбековна, докторант по специальности «Теплоэнергетика», Институт энергетики и зеленых технологий, Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: m.karimoldanova@aues.kz, https://orcid.org/0009-0009-6762-7901

Карманов Амангельды Ерболович, PhD, профессор кафедры «Теплоэнергетика», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140003, Республика Казахстан, e-mail: aman270685@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7512-0275

Катранова Газиза Сериковна, PhD, специалист по работе с персоналом ТОО «Феникс Интернешнл Ресорсиз Каспиан», г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: gaziza.katranova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0688-5324

Килибаев Еркебулан Омирлиевич, кандидат технических наук, и.о. доцента кафедры «Стандартизация, сертификация и метрология», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, 010001, Республика Казахстан, e-mail: 1k.e.o_77@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1847-4824

Кирий Павел Викторович, магистрант ОП 7M07101 «Электроэнергетика», факультет машиностроения, энергетики и информационных технологий, Костанайский региональный университет имени А. Байтұрсынұлы, г. Костанай, 110000, Республика Казахстан, e-mail: studp4vsh4rk@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-9462-9139

Кылышкожа Нурай Нуркожакызы, магистр по специальности «Аэрокосмическая инженерия», Университет Падовы, Падуя, г. Венето, 35122, Итальянская Республика, e-mail: nkylyshkozha@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-4340-178X

Кокаев Умиржан Шералиевич, кандидат технических наук, декан Транспортно-энергетического факультета, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010001, Республика Казахстан, e-mail: kokayev_ush@enu.kz, https://orcid.org/0009-0001-3636-8435

Копышева Асия Кажыгалиевна, докторант 3 курса кафедры «Теплоэнергетика», Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: Assiya-901405@yandex.kz, https://orcid.org/0009-0007-1227-9810

Корамбаев Данат Рустемович, магистрант, факультет энергетики, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: danat.korambaev@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-8355-3562

Кунтубаева Жайна Ганиевна, бакалавр, Физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: Zhaina.Kuntubayeva@kaznu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0001-8010-9510

Лаврентьев Алексей Владимирович, преподаватель кафедры «Компьютерная лингвистика», КГУСТА имени Н. Исанова, г. Бишкек, Кыргызская Республика, e-mail: teolidz@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-6884-8980

Мәди Перизат Шаймуратқызы, и.о. ассоц. профессора ГОП «Электротехника и автоматизация», Институт энергетики, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: p.madi@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-5930-8112

Машрапов Бауыржан Ерболович, PhD, ассоц. профессор, факультет энергетики, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: bokamashrapov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3018-4125

Меирбекова Оксана Даировна, ст. преподаватель, Международный казахско-турецкий университет имени Хожди Ахмеда Ясави, г. Туркестан, 161200, Республика Казахстан, e-mail: oksana_120183@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0949-1443

Мергалиев Нурболат Тасбулатович, начальник производственно-технического отдела Астанинского производственного филиала АО «QazaqGaz Aimaq», г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: nmergaliev@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-7101-775X

Мерзадинова Гульнара Тынышбаевна, доктор технических наук, профессор-практик, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: gera.62@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2799-7026

Мехтиев Али Джаванширович, кандидат технических наук, ассоц. профессор, Институт энергетики, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, проректор по науке и инновациям, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: barton.kz@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2633-3976

Минажова Саулеш Аманбаевна, PhD, научный сотрудник, ТОО «QazNRG Group», г. Алматы, 050060, Республика Казахстан, e-mail: s.minazhova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-5461-2251

Миргородский Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: serg.mirg@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0009-5106-3574

Молдыбаева Нургул Искаккызы, PhD, ст. преподаватель кафедры «Энергетика и электротехника», факультет «Инженерные технологии», Казахский Национальный Аграрный Исследовательский Университет, г. Алматы, 050010, Республика Казахстан, e-mail: moldybayeva78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5016-8800

Мустафина Раиса Мухаметжаровна, профессор, кандидат технических наук, доцент, факультет энергетики, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: mustafina_rm@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-8739-7377

Налибаев Отабек Шакирович, магистрант кафедры электроэнергетики и охраны труда, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: a.nalibayev@alageum.com, https://orcid.org/0009-0007-5826-6003

Нефтисов Александр Витальевич, PhD, ассоц. профессор, Academy of Physical Education and Mass Sports, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: shurik-neftisov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4079-2025

Никифоров Александр Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика», факультет энергетики, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: aleke4599@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6977-0957

Нургалиева Рахиля Турсынжановна, ст. преподаватель, Казахский Национальный Исследовательский Технический университет имени К. Сатпаева, Международный инженерно-технологический университет,

г. Алматы, 050005, Республика Казахстан, e-mail: Nurgaliyeva.R@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0009-0004-2136-8557

Нуркен Сакенулы Кыдыров, докторант по специальности «Электроэнергетика», Автоматизация производственных процессов, факультет энергетики, автоматики и телекоммуникаций, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012/M00A1T8, Республика Казахстан, e-mail: nurken.kydyrov20@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-8732-3775

Обозов Алайбек Джумабекович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН КР, заведующий лабораторией возобновляемых источников энергии Национальной академии наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, 720055, Кыргызская Республика, e-mail: alaibek.obozov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7854-5831

Омар Дәурен Рашитұлы, PhD, заведующий лабораторией «Энергосбережения и зеленой энергетики», ТОО «Научно Производственный Центр «Агроинженерии», младший научный сотрудник, Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, г. Алматы, 050005, Республика Казахстан, e-mail: omardauren@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7857-0316

Омаров Рашит Абдыгаравович, доктор технических наук, профессор, ТОО «Научно Производственный Центр «Агроинженерии», Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, г. Алматы, 050005, Республика Казахстан, e-mail: omarov-rashin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9961-7657

Оразбай Мухтар Нурболулы, Научно-инновационный центр «Индустрия 4.0», Astana IT University, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: m.orazbay@astanait.edu.kz, https://orcid.org/0009-0001-4994-6484

Ордабаев Батырбек Ерболатович, докторант кафедры «Электротехники и Автоматизации», факультет энергетики, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: inzhener.kipgnps@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-5457-3490

Орман Индира Маликовна, докторант по специальности «Информатика, вычислительная техника и управление», Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, г. Петропавловск, 010000, Казахстан, e-mail: Indira.malikovna@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-8072-4996

Плевако Анжела Петровна, ст. преподаватель кафедры «Теплоэнергетика», Торайгыров университет, г. Павлодар, 140003, Республика Казахстан, e-mail: plada78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3080-5531

Починок Сергей Федорович, Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова, г. Бишкек, 720044, Кыргызская Республика, e-mail: info@incomcompany.kz, https://orcid.org/0009-0006-2262-2283

Раделюк Иван Михайлович, PhD, ассоц. профессор, доцент, факультет естественных наук, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: drivanradelyuk@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6067-3034

Рахметова Айбота Муратовна, доктор экономических наук, профессор, Секретариат по Целям устойчивого развития Института экономических исследований, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: Aibota@mail.kz, https://orcid.org/0000-0002-8741-0373

Ромадин Алексей Юрьевич, эксперт Павлодарского филиала АО «Национальный центр экспертизы и сертификации», г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: Me_kom@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-9514-4187

Рустамов Насим Тулегенович, доктор технических наук, старший преподаватель, Международный казахско-турецкий университет имени Хожди Ахмеда Ясави, г. Туркестан, 161200, Республика Казахстан, e-mail: nasim52@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6437-6600

Сагындык Айгерим Бекеновна, ассоц. профессор, доцент, факультет энергетики, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: aiko_.90@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0376-2150

Саракешова Нурбуби Нуркеновна, PhD, руководитель Группы образовательных программ «Теплоэнергетика», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: n.sarakeshova@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0007-9362-7740

Сарсенбаев Ерлан Алиаскарович, PhD, ассоц. профессор кафедры электроэнергетики и охраны труда, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: y.sarsenbayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-8887-1171

Сатенова Мадина Бактибековна, сениор-лектор кафедры энергетики, докторант 1-го курса, Университет ALT, г. Алматы, 050012, Казахстан, e-mail: msb_madeka@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-5778-2536

Сейдулла Жанибек Канатбекулы, PhD, Физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050040, Республика Казахстан, e-mail: Zhanibek.seidulla@kaznu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0413-6557

Старчеус Александр Николаевич, магистрант ОП 7М07102 «Электроэнергетика», Высшая школа электроэнергетики и информационных систем, Рудненский индустриальный университет, г. Рудный, 111500, Республика Казахстан, e-mail: srewqas86@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-1073-3822

Сулейменова Гульмира Оразбаевна, докторант по ОП «Электротехнические комплексы и системы», Институт энергетики, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: suleymenovagomail.ru, https://orcid.org/0009-0005-1404-5095

Тастенов Амангельды Дыбысбекович, профессор, кандидат технических наук, факультет энергетики, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: tastenov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-1101-5328

Толеубеков Едил Кайратулы, магистр электроэнергетики, преподаватель, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: edilinho@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-4024-1151

Тулебаева Гулдана Анапияевна, преподаватель, Международный казахско-турецкий университет имени Хожди Ахмеда Ясави, г. Туркестан, 161200, Республика Казахстан, e-mail: dana86_01@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-8886-6381

Тютебаева Галия Муафековна, кандидат технических наук, ассоциированный профессор, доцент, Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: galiatyutebayeva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3503-2569

Уахитова Айгуль Ботановна, кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: a.uakhitova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6317-8178

Умбетов Ерик Сериккалиевич, кандидат технических наук, Казахский национальный женский педагогический университет, 050000, Республика Казахстан, e-mail: erumbetov64@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6645-3489

Умурзакова Анара Даукеновна, PhD, Институт энергетики, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 020000, Республика Казахстан, e-mail: granat_72@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7683-5256

Хажин Ильгиз Азаматович, магистрант, факультет энергетики, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: ihazhin7@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-5067-607X

Хамбар Бакытгул, кандидат экономических наук, Секретариат по Целям устойчивого развития Института экономических исследований, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: 237809@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5075-3842

Чимкентбаева Роза Макашевна, докторант образовательной программы «Электроэнергетика», Высшая школа «Информационные технологии и энергетика», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, 160012, Республика Казахстан, e-mail: Roza-0515@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-3124-6051

Шамкен Нур-Астан Болатович, PhD кафедры «Системного анализа и управления», Евразийский Национальный Университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010012, Республика Казахстан, e-mail: nurastan98@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-3080-2399

Шимпф Алексей Андреевич, преподаватель-ассистент, кафедра «Электротехника и автоматизация», факультет энергетики, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: shimpf5329@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4203-9117

Шопаева Айман Амановна, докторант по специальности «Теплоэнергетика», Транспортно-энергетический факультет, Евразийский Национальный Университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: aisham.expert@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-9338-1911

Шыныбай Жандос Сапарғалиұлы, PhD, ассоц. профессор кафедры «Энергетика», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: z.shynybay@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-9310-0339

Юрченко Алексей Васильевич, доктор технических наук, профессор электроэнергетики, Исследовательская школа физики высокоэнергетических процессов, Томский политехнический университет, г. Томск, 634050, Российская Федерация, e-mail: reaper@tpu.ru, https://orcid.org/0000-0002-7854-5495

Ярославцев Михаил Викторович, кандидат технических наук, доцент, факультет энергетики, Торайгыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: myaroslavtsev@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4666-1296

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Abitayeva Rahimash Shanrakbaevna, Senior Lecturer, Satbayev University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: r.abitayeva@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-0431-9559

Abylkairov Temirlan Manatovich, PhD student in «Electrical Power Engineering», Institute of Energy and Green Technologies, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: t.abylkairov@aues.kz, https://orcid.org/0009-0008-2523-8513

Aitmagambetova Gulmira Askerbekkyzy, Doctoral student in «Thermal Power Engineering», Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: gul_2904@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7934-9990

Aituarova Moldir Turalyevna, 1st year Master's student of the specialty 7M07101 «Electric Power Engineering», Faculty of Mechanical Engineering, Energy and Information Technologies, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University, Kostanay, 110000, Republic of Kazakhstan, e-mail: aitumold@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-3729-0596

Akayev Aybek Muratbekovich, Doctor PhD, Dean of the School, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: aybek.akaev.vko_81@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9390-5703

Akimbek Gulmira Abilkairkyzy, PhD, Acting Associate Professor, Department of Thermal Power Engineering, Faculty of Transport and Power Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 10000, Republic of Kazakhstan, e-mail: akimbekg@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7773-6479

Alimgazin Altai Shurumbaevich, Acting Professor of the Department of Thermal Power Engineering, Faculty of Transport and Energy, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: alimgazin_altai@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5848-1842

Aliyarov Birlesbek Kanievich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Thermal Power Engineering, Institute of Energy and Green Technologies, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: aliyarov_b@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8612-6779

Amir Bakhyt Tleulesovich, Candidate of Technical Sciences, Faculty of Physics and Technology, Thermal Physics and Technical Physics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: Bakyt.Amir@kaznu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0003-9347-8379

Apsemetova Aizhan, Doctoral student in the «Electroenergetics» Educational Program, Higher School of Information Technologies and Energy, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, 160012, Republic of Kazakhstan, e-mail: aaizgan@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-0515-6648

Aripova Nazgul Mikhailovna, Doctor PhD, Associate Professor of the Department of Heat Power Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, 140003, Republic of Kazakhstan, e-mail: nazgul_2010@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2760-8617

Arpish Aibar, Doctoral student, Master of Technical Sciences, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: aibar201329@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-3368-6081

Arystanbayev Kuttybek, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of «Pharmaceutical Production Technology», «South Kazakhstan Medical Academy» JSC, Shymkent, 160001, Republic of Kazakhstan, e-mail: 201ukgu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9499-192X

Aubakirova Aliya Muratovna, Doctoral student in «Computer Science», School of Software Engineering, Research and Innovation Center «Industry 4.0», Astana IT University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Aliya.Aubakirova@astanait.edu.kz, https://orcid.org/0009-0004-6925-6714

Azamatov Murat Toktarbekovich, Doctoral student in «Automation and Management», Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: muratazamatov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-6956-0822

Babakhan Shokhrukh Abdilkasymovich, Senior Lecturer, Akhmet Yassawi International Kazakh–Turkish University, Turkistan, 161200, Republic of Kazakhstan, e-mail: babakhan.shokhrukh@ayu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7723-0045

Baimbetov Nurlan Abishovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Standardization, Certification and Metrology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010001, Republic of Kazakhstan, e-mail: nb.s.78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0990-8731

Bainiyazov Bahtybek Askerovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Power Engineering, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: b.bayniyazov@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-1103-2329

Barukin Alexsandr Sergeevich, PhD, Professor, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: alexbarukin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5969-4030

Bayanova Aigerim Kairgeldinovna, Lecturer of the Department of Heat Power Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140003, Republic of Kazakhstan, e-mail: bayanovaak1@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-7476-529X

Beisenbi Mamyrbek Aukebayevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Systems Analysis and Management, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010012, Republic of Kazakhstan, e-mail: beisenbi@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2109-4512

Bekbayev Amangeldy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Satbayev University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.bekbayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0003-3520-1710

Bekbolatova Zhannat K., PhD, Associate Professor, Faculty of Power Engineering, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Zh.Bekbolatova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-8219-6400

Bekenov Tasybek Nusupbekovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Organization of Transportation, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010012, Republic of Kazakhstan, e-mail: bekbken@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0188-822X

Bektasova Asemgul Aitpaevna, Master of Technical Sciences, Senior Lecturer, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: bektasova_aa@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-8888-8894

Bektibay Birzhan Zhasarbekovich, Candidate of Technical Sciences, Faculty of Physics and Technology, Thermal Physics and Technical Physics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: bektibaybirzhan@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6411-8049

Bektimirov Anur Talgatovich, PhD, Associate Professor, Institute of Energy and Green Technologies, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, CEO, LLP «R&D Power Grid Automation», Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.bektimirov@aues.kz, https://orcid.org/0000-0001-5609-6206

Berguzinov Askhat Nurlanovich, PhD, Professor, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: askhat_berguzinov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6954-8259

Biloshchytskyi Andrii Oleksandrovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Science and Innovation, Astana IT University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, Department of Information Technology, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 03680, Ukraine, e-mail: bao1978@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9548-1959

Chimkentbaeva Roza, Doctoral student in the «Electroenergetics» Educational Program, Higher School of Information Technologies and Energy, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, 160012, Republic of Kazakhstan, e-mail: Roza-0515@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-3124-6051

Dautov Sukhrab Srapulovich, Senior Lecturer, Department of Energy, ALT University, Director of LLP «Kazakh Institute of Technical Development», Almaty, 050010, Kazakhstan, e-mail: sukhrab_dautov@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-2135-0790

Demessova Saule, PhD, Kazakh National Agrarian Research University, Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan, e-mail: saule.demesova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-9224-6460

Dinmukhanbetova Aigul Zhumageldyevna, PhD, Associate Professor, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: ardi100909@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-4538-9672

Dobrenko Maxim Alexandrovich, Master's student, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: maksimka.dobrenko@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-3348-9503

Gabdulov Asset Uralbaevich, Doctoral student of the Department of Heat Power Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140003, Republic of Kazakhstan, e-mail: gabdulov25@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-3266-8270

Gabyl-Manapova Fariza Askhatkyzy, Doctoral student in «Electric Power Engineering», Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: fariza2909@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-1281-1302

Honcharenko Tetyana Andriivna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Technology, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 03680, Ukraine, e-mail: goncharenko.ta@knuba.edu.ua, https://orcid.org/0000-0003-2577-6916

Ibragimova Svetlana Viktorovna, Candidate of Technical Sciences, Professor Assistant, Faculty of Mechanical Engineering, Energy and Information Technologies, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University, Kostanay,

110000, Republic of Kazakhstan, e-mail: ibragimovasvetlana75@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-2798-9149

Isataev Muhtar, Associate Professor, Faculty of Physics and Technology, Thermal Physics and Technical Physics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: muhtar.isataev@kaznu.kz, https://orcid.org/0000-0001-8248-670X

Ishangalieva Arailym Fazylovna, Teacher, Secondary School named M-S. Babazhanova, West Kazakhstan, 090200, Republic of Kazakhstan, e-mail: araika0177@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-3719-7908

Iskakov Kazizat Takuadinovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kazizat@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3872-4026

Issabekov Zhanat Beisembayevich, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Automation, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: zh_is@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3980-1617

Issabekova Bibigul Beisembayevna, PhD, Associate Professor, Faculty of Computer Science, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: asbizh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5044-3211

Kalkabaeva Gulmira Urkenovna, Senior Lecturer, Language Education Department, JSC ALT University named after Mukhamedzhan Tynyshpaev, Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan, e-mail: g.kalkabaeva@alt.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-8311-5660

Kaltayev Abdulla Gabdylmanapuly, Associate Professor, Toraighyrov University, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: abdulla911@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1684-3347

Kangozhin Bekmukhambet Rashitovich, Professor, Department of Energy, ALT University, General Director of LLP «Kazakh Institute of Technical Development», Almaty, 050010, Kazakhstan, e-mail: almaty_bek@inbox.ru, https://orcid.org/0009-0000-1023-9873

Karimoldanova Marjan Adilbekovna, Doctoral student in Thermal Power Engineering, Institute of Energy and Green Technologies, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: m.karimoldanova@aues.kz, https://orcid.org/0009-0009-6762-7901

Karmanov Amangeldy Erbolovich, Doctor PhD, Professor of the Department of Heat Power Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140003, Republic of Kazakhstan, e-mail: aman270685@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7512-0275

Katranova Gaziza Serikovna, PhD, HR Specialist, Phoenix International Resources Caspian LLP, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: gaziza.katranova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0688-5324

Kaverin Vladimir Viktorovich, PhD, Acting Professor in Electrical Engineering, Department of Automation of Manufacturing Processes, Faculty of Power Engineering, Automation and Telecommunications, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100012/M00A1T8, Republic of Kazakhstan, e-mail: v.kaverin@ktu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2021-7445

Kazambayev Ilyas Maratuly, PhD student in «Control of Technical Systems», Institute of Energy, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Acting Director of the Research Center «Industry 4.0», Astana IT University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: ilyaskazambayev@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0850-7490

Khambar Bakytgul, Candidate of Economic Sciences, Secretariat for Sustainable Development Goals of Economic Research Institute, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: 237809@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5075-3842

Khazhin Ilgiz Azamatovich, Master's student, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: ihazhin7@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-5067-607X

Kilibayev Yerkebulan Omirlievich, Acting Associate Professor of the Department of Standardization, Certification and Metrology, Candidate of Technical Sciences, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010001, Republic of Kazakhstan, e-mail: 1k.e.o_77@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1847-4824

Kiriy Pavel Viktorovich, 1st year Master's student of the specialty 7M07101 «Electric Power Engineering», Faculty of Mechanical Engineering, Energy and Information Technologies, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University, Kostanay, 110000, Republic of Kazakhstan, e-mail: studp4vsh4rk@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-9462-9139

Kokayev Umirzhan Sheralievich, Candidate of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Transport and Energy, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010001, Republic of Kazakhstan, e-mail: kokayev_ush@enu.kz, https://orcid.org/0009-0001-3636-8435

Kopysheva Assiya Kazhygalievna, 3rd year Doctoral student of the Department of Thermal Power Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Assiya-901405@yandex.kz, https://orcid.org/0009-0007-1227-9810

Korambaev Danat Rustemovich, Master's student, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: danat.korambaev@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-8355-3562

Kuntubayeva Zhayna Ganievna, Bachelor, Faculty of Physics and Technology, Thermal Physics and Technical Physics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: Zhaina.Kuntubayeva@kaznu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0001-8010-9510

Kydyrov Nurken Sakenuly, Doctoral student in Electrical Engineering, Department of Automation of Manufacturing Processes, Faculty of Power Engineering, Automation and Telecommunications, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, 100012/M00A1T8, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurken.kydyrov20@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-8732-3775

Kylyshkozha Nuray Nurkozhakyzy, Master's student in Aerospace Engineering, University of Padua, Padua, Veneto, 35122, Italian Republic, e-mail: nkylyshkozha@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-4340-178X

Lavrentyev Alexey Vladimirovich, Lecturer at the Department of Computer Linguistics, Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov, Bishkek, postal code not specified, Kyrgyz Republic, e-mail: teolidz@mail.ru, https://orcid.org/0009-0003-6884-8980

Madi Perizat Shaimuratkyzy, Acting Associate Professor, Electrical Engineering and Automation, Institute of Energy, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: p.madi@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0001-5930-8112

Mashrapova Bauyrzhan Erbolovich, PhD, Associate Professor, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: bokamashrapov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3018-4125

Meirbekova Oxana Dairovna, Senior Lecturer, Akhmet Yassawi International Kazakh–Turkish University, Turkistan, 161200, Republic of Kazakhstan, e-mail: oksana_120183@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0949-1443

Mekhtiev Ali Javanshirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Energy, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Vice-Rector for Science and Innovation, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: barton.kz@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2633-3976

Mergaliev Nurbolat Tasbulatovich, Head of the Production and Technical Department of the Astana Production Branch of «QazaqGaz Aimaq» JSC, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nmergaliev@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-7101-775X

Merzadinova Gulnara Tynyshbaevna, Doctor of Technical Sciences, Professor-Practitioner, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: gera.62@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2799-7026

Minazhova Saulesh, PhD, Researcher, «QazNRG Group» LLP, Almaty, 050060, Republic of Kazakhstan, e-mail: s.minazhova@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-5461-2251

Mirgorodskiy Sergey Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: serg.mirg@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0009-5106-3574

Moldybaeva Nurgul Iskakkyzy, PhD, Senior Lecturer, Department of Energy and Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kazakh National Agrarian Research University, Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan, e-mail: moldybayeva78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5016-8800

Mustafina Raisa Mukhametzharovna, Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: mustafina_rm@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-8739-7377

Nalibayev Otabek Shakirovich, Graduate student, Department of Electric Power Engineering and Labour Protection, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.nalibayev@alageum.com, https://orcid.org/0009-0007-5826-6003

Neftissov Alexandr Vitalievich, PhD, Associate Professor, Academy of Physical Education and Mass Sports, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: shurik-neftisov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4079-2025

Nikiforov Alexander Stepanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Thermal Power Engineering, Toraighyrov University, Faculty of Energy, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: aleke4599@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6977-0957

Nurgaliyeva Rakhilya, Senior Lecturer, Satbayev University, International Engineering and Technological University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: Nurgaliyeva.R@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0009-0004-2136-8557

Obozov Alaibek Dzhumabekovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Head of the Laboratory of Renewable Energy Sources, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, 720055, Kyrgyz Republic, e-mail: alaibek.obozov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7854-5831

Omar Dauren Rashituly, PhD, Head of the Laboratory «Energy Saving and Green Energy», Scientific Production Center of Agricultural Engineering, Junior Research Assistant, Almaty University of Energy and Communications named after G. Daukeev, Almaty, 050005, Republic of Kazakhstan, e-mail: omardauren@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7857-0316

Omarov Rashit Abdygaravovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Production Center of Agricultural Engineering, Almaty University of Energy and Communications named after G. Daukeev, Almaty, 050005, Republic of Kazakhstan, e-mail: omarov-rashin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9961-7657

Orazbay Mukhtar Nurboluly, Research and Innovation Center «Industry 4.0», Astana IT University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: m.orazbay@astanait.edu.kz, https://orcid.org/0009-0001-4994-6484

Ordabayev Batyrbek Yerbolatovich, PhD student, Department of Electrical Engineering and Automation, Faculty of Energy, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: inzhener.kipgnps@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-5457-3490

Orman Indira Malikovna, Doctoral candidate in Computer Science, Computer Engineering and Management, M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, 010000, Kazakhstan, e-mail: Indira.malikovna@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-8072-4996

Plevako Angela Petrovna, Senior Lecturer of the Department of Heat Power Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140003, Republic of Kazakhstan, e-mail: plada78@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3080-5531

Pochinok Sergey Fedorovich, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, 720044, Kyrgyz Republic, e-mail: info@incomcompany.kz, https://orcid.org/0009-0006-2262-2283

Radelyuk Ivan Mikhailovich, PhD, Associate Professor, Faculty of Natural Sciences, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: drivanradelyuk@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6067-3034

Rakhmetova Aibota Muratovna, Doctor of Economics, Professor, Secretariat for Sustainable Development Goals of Economic Research Institute, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Aibota@mail.kz, https://orcid.org/0000-0002-8741-0373

Romadin Alexey Yuryevich, Expert, Pavlodar Branch of JSC «National Center for Expertise and Certification», Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Me_kom@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-9514-4187

Rustamov Nassim Tulegenovich, Doctor of Technical Sciences, Senior Lecturer, Akhmet Yassawi International Kazakh–Turkish University, Turkistan, 161200, Republic of Kazakhstan, e-mail: nasim52@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6437-6600

Saghyndyk Aigerim Bekenkyzy, Associate Professor, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: aiko_.90@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0376-2150

Sarakeshova Nurbubi Nurkenovna, PhD, Head of the Educational Program «Thermal Power Engineering», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: n.sarakeshova@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0009-0007-9362-7740

Sarsenbayev Yerlan, PhD, Associate Professor, Department of Electric Power Engineering and Labour Protection, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: y.sarsenbayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-8887-1171

Satenova Madina Baktibekovna, Senior Lecturer, Department of Energy, 1st year Doctoral student, ALT University, Almaty, 050012, Kazakhstan, e-mail: msb_madeka@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-5778-2536

Seidulla Zhanibek, PhD, Faculty of Physics and Technology, Thermal Physics and Technical Physics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan, e-mail: Zhanibek.seidulla@kaznu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0003-0413-6557

Shamken Nur-Astan Bolatuly, PhD, Department of Systems Analysis and Management, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010012, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurastan98@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-3080-2399

Shimpf Alexey Andreevich, Assistant Lecturer, Department of Electrical Engineering and Automation, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: shimpf5329@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4203-9117

Shopayeva Aiman Amanovna, PhD student in Thermal Power Engineering, Faculty of Transport and Energy, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: aisham.expert@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-9338-1911

Shynybay Zhandos, PhD, Associate Professor, Department of Power Engineering, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: z.shynybay@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-9310-0339

Starcheus Alexander Nikolayevich, 2nd-year Master's student of the educational program 7M07102 «Electric Power Engineering», Higher School of Energy and Information Systems, Rudny Industrial University, Rudny, 111500, Republic of Kazakhstan, e-mail: srewqas86@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-1073-3822

Suleymenova Gulmira Orazbaevna, Doctoral student in «Electrotechnical Complexes and Systems» EP, Institute of Power Engineering, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: suleymenovagomail.ru, https://orcid.org/0009-0005-1404-5095

Tastenov Amangeldy Dybysbekovich, Professor, Candidate of Technical Sciences, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: tastenov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-1101-5328

Toleubekov Yedil Kairatuly, Master of Electrical Engineering, Lecturer, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: edilinho@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-4024-1151

Tulebaeva Guldana Anapiyaeva, Lecturer, Akhmet Yassawi International Kazakh–Turkish University, Turkistan, 161200, Republic of Kazakhstan, e-mail: dana86_01@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-8886-6381

Tyutebayeva Galiya Muafekovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: galiatyutebayeva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3503-2569

Uakhitova Aigul, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.uakhitova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6317-8178

Umbetov Eriq Serikkaliievich, Candidate of Technical Sciences, Kazakh National Women's Pedagogical University, city not specified, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: erumbetov64@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6645-3489

Umurzakova Anara Daukenovna, PhD, Institute of Energy, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 020000, Republic of Kazakhstan, e-mail: granat_72@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7683-5256

Voronkov Vladimir Vladimirovich, Master's student in «Chemical Technology of Organic Substances», Faculty of Natural Sciences, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: volodya.voronkov.00@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-4645-2884

Yaroslavtsev Mikhail Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: myaroslavtsev@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4666-1296

Yergaliyev Azamat Bagdatovich, Master of Technical Sciences, Teacher-Assistant, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: yergaliyev10@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-1315-2615

Yerkongyr Assel, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering and Occupational Safety, Zhezkazgan University named after O.A. Baikonurov, Zhezkazgan, 100600, Republic of Kazakhstan, e-mail: aselkuntuganovna@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-3296-976X

Yerulanova Aizhan Erulanovna, PhD, Institute of Energy, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 020000, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.erulanova@kazatu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-8429-8507

Yesmakhanova Laura, PhD, Department of Automation and Telecommunications, Faculty of Technology, M.Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, 080000, Republic of Kazakhstan, e-mail: laura060780@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3308-9676

Yurchenko Alexey Vasilievich, Doctor of Technical Sciences, Professor in Electrical Engineering, Research School of Physics of High-Energy Processes, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russian Federation, e-mail: reaper@tpu.ru, https://orcid.org/0000-0002-7854-5495

Zhakishev Bauyrzhan Aitmukashevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010001, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhakishev_ba@enu.kz, https://orcid.org/0009-0006-4642-6818

Zhalmagambetova Ultuar Kairbulatovna, PhD, Professor of the Department of Thermal Power Engineering, Faculty of Power Engineering, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: ultuara@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2261-2222

Zhantlessova Asemgul Beisembayevna, PhD, Acting Associate Professor, Kazakh State University named after S. Seifullin, Astana, 010008, Republic of Kazakhstan, e-mail: acbizh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3730-0579

Zharmagambetova Meruert Sovetovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Higher Attestation Commission, Department of Energy, Rector, ALT University, Almaty, 050012, Kazakhstan, e-mail: rector@alt.edu.kz, https://orcid.org/0009-0008-3355-8293

Zhumalieva Altynai Kairbekovna, Master of Engineering Sciences, Senior Lecturer, Educational Program «Thermal Power Engineering», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhumaliyeva1990@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-0342-1869

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ («ВЕСТНИК ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА», «КРАЕВЕДЕНИЕ»)

Редакционная коллегия просит авторов руководствоваться следующими правилами при подготовке статей для опубликования в журнале.

Научные статьи, представляемые в редакцию журнала должны быть оформлены согласно базовым издательским стандартам по оформлению статей в соответствии с ГОСТ 7.5-98 «Журналы, сборники, информационные издания. Издательское оформление публикуемых материалов», пристатейных библиографических списков в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления».

***В номер допускается не более одной рукописи от одного автора либо того же автора в составе коллектива соавторов.**

***Количество соавторов одной статьи не более 5.**

***Степень оригинальности статьи должна составлять не менее 60 %.**

***Направляемые статьи не должны быть ранее опубликованы, не допускается последующее опубликование в других журналах, в том числе переводы на другие языки.**

***Решение о принятии рукописи к опубликованию принимается после проведения процедуры рецензирования.**

***Рецензирование проводится конфиденциально («двустороннее слепое рецензирование»), автору не сообщается имя рецензента, а рецензенту – имя автора статьи.**

*** Квитанция об оплате предоставляется после принятия статьи к публикации. Стоимость публикации в журнале составляет 25 000 (двадцать пять тысяч) тенге.**

*** Оплата за статью не возвращается в случае, если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом.**

Статьи должны быть оформлены в строгом соответствии со следующими правилами:

– В журналы принимаются статьи по всем научным направлениям, набранные на компьютере, напечатанные на одной стороне листа с полями 30 мм со всех сторон листа, электронный носитель со всеми материалами в текстовом редакторе «Microsoft Office Word (97, 2000, 2007, 2010) для WINDOWS».

– Общий объем статьи, включая аннотации, литературу, таблицы, рисунки и математические формулы не должен превышать **12 страниц** печатного текста. *Текст статьи: кегль – 14 пунктов, гарнитура – Times New Roman (для русского, английского и немецкого языков), KZ Times New Roman (для казахского языка).*

Структура научной статьи включает название, аннотации, ключевые слова, основные положения, введение, материалы и методы, результаты и обсуждение, заключение, выводы, информацию о финансировании (при наличии), список литературы (используемых источников) к каждой статье, включая романизированный (транслитерированный латинским алфавитом) вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках) *см. ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом.*

Статья должна содержать:

1 **МРНТИ** (Межгосударственный рубрикатор научной технической информации);

2 **DOI** – после МРНТИ в верхнем правом углу (присваивается и заполняется редакцией журнала);

3 **Фамилия, имя, отчество (полностью)** автора (-ов) – на казахском, русском и английском языках *(жирным шрифтом, по центру),* **главного автора пометить символом (*);**

4 **Ученая степень, ученое звание;**

5 **Аффилиация** (факультет или иное структурное подразделение, организация (место работы (учебы)), город, почтовый индекс, страна) – на казахском, русском и английском языках;

6 **E-mail;**

7**Название статьи** должно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. В название статьи необходимо вложить информативность, привлекательность и уникальность *(не более 12 слов, прописными буквами, жирным шрифтом, по центру, на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий);*

8 **Аннотация** – краткая характеристика назначения, содержания, вида, формы и других особенностей статьи. Должна отражать основные и ценные, по мнению автора, этапы, объекты, их признаки и выводы проведенного исследования. Дается на казахском, русском и английском либо немецком языках *(рекомендуемый объем аннотации – не менее 150, не более 300 слов, курсив, нежирным шрифтом, кегль – 12 пунктов, абзацный отступ слева и справа 1 см, см. образец);*

9 **Ключевые слова** – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования *(оформляются на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий; кегль – 12 пунктов, курсив, отступ слева-справа – 1 см.).* Рекомендуемое количество ключевых слов – 5-8, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3. Задаются в порядке их значимости, т.е. самое важное ключевое слово статьи должно быть первым в списке (см. образец);

10 **Основной текст статьи** излагается в определенной последовательности его частей, включает в себя:

- **Введение / Кіріспе / Introduction** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов).* Обоснование выбора темы; актуальность темы или проблемы. Актуальность темы определяется общим интересом к изученности данного объекта, но отсутствием исчерпывающих ответов на имеющиеся вопросы, она доказывается теоретической или практической значимостью темы.

- **Материалы и методы** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов).* Должны состоять из описания материалов и хода работы, а также полного описания использованных методов.

- **Результаты и обсуждение** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов).* Приводится анализ и обсуждение полученных вами результатов исследования. Приводятся выводы по полученным в ходе исследования результатам, раскрывается основная суть. И это один из самых важных разделов статьи. В нем необходимо провести анализ результатов своей работы и обсуждение соответствующих результатов в сравнении с предыдущими работами, анализами и выводами.

- **Информацию о финансировании** *(при наличии) (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов).*

- **Выводы / Қорытынды / Conclusion** *(абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов).*

Выводы – обобщение и подведение итогов работы на данном этапе; подтверждение истинности выдвигаемого утверждения, высказанного автором, и заключение автора об изменении научного знания с учетом полученных результатов. Выводы не должны быть абстрактными, они должны быть использованы для обобщения результатов исследования в той или иной научной области, с описанием предложений или возможностей дальнейшей работы.

- **Список использованных источников / Пайдаланған деректер тізімі / References** *(жирными буквами, кегль – 14 пунктов, в центре)* включает в себя:

Статья и список использованных источников должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.5-98; ГОСТ 7.1-2003 *(см. образец).*

Очередность источников определяется следующим образом: сначала последовательные ссылки, т.е. источники на которые вы ссылаетесь по очередности в самой статье. Затем дополнительные источники, на которых нет ссылок, т.е. источники, которые не имели место в статье, но

рекомендованы вами читателям для ознакомления, как смежные работы, проводимые параллельно. *Объем не менее 10 не более чем 20 наименований* (ссылки и примечания в статье обозначаются сквозной нумерацией и заключаются в квадратные скобки). В случае наличия в списке использованных источников работ, представленных на кириллице, необходимо представить список литературы в двух вариантах: первый – в оригинале, второй – романизированный (транслитерация латинским алфавитом) вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках) *см. ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом.*

Романизированный список литературы должен выглядеть следующим образом:

автор(-ы) (транслитерация) → название статьи в транслитерированном варианте → [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках] → название казахоязычного либо русскоязычного источника (транслитерация, либо английское название – если есть) → выходные данные с обозначениями на английском языке.

11 **Иллюстрации, перечень рисунков и подрисуночные надписи к ним** представляют по тексту статьи. В электронной версии рисунки и иллюстрации представляются в формате TIF или JPG с разрешением не менее 300 dpi.

12 **Математические формулы** должны быть набраны в Microsoft Equation Editor (каждая формула – один объект).

На отдельной странице (после статьи)

В электронном варианте приводятся полные почтовые адреса, номера служебного и домашнего телефонов, e-mail (номер телефона для связи редакции с авторами, не публикуются);

Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Фамилия Имя Отчество (полностью)		
Должность, ученая степень, звание		
Организация		
Город		
Индекс		
Страна		
E-mail		
Телефон		

Информация для авторов

Для статей, публикуемых в Научном журнале Торайгыров университет. Химико-биологическая серия, требуется экспертное заключение.

Редакция не занимается литературной и стилистической обработкой статьи.

Если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом статья возвращается автору на доработку. Автор может повторно отправить статью на антиплагиат или рецензензирование 1 раз. За содержание статьи несет ответственность Автор.

Статьи, оформленные с нарушением требований, к публикации не принимаются и возвращаются авторам.

Датой поступления статьи считается дата получения редакцией ее окончательного варианта.

Статьи публикуются по мере поступления.

Периодичность издания журналов – четыре раза в год (ежеквартально)

Сроки подачи статьи:

- первый квартал до 01 февраля;
- второй квартал до 01 мая;
- третий квартал до 01 августа;
- четвертый квартал до 01 ноября.

Квитанция об оплате предоставляется после принятия статьи к публикации. Стоимость публикации в журнале составляет 25 000 (двадцать пять тысяч) тенге.

Статью (электронную версию, и квитанции об оплате) следует направлять на сайт: www.vestnik-energy.tou.edu.kz. Для подачи статьи на публикацию необходимо пройти регистрацию на сайте.

140008, Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64,
НАО «Торайгыров университет»,
Издательство «Toraighyrov University».
Тел. 8 (7182) 67-36-69, (внутр. 1147).
E-mai1: **kereku@tou.edu.kz**

Наши реквизиты:

НАО «Торайгыров университет» РНН 451800030073 БИН 990140004654	Приложение kaspi.kz Платежи – Образование –Оплата за ВУЗы –Заполняете все графы (в графе Факультет укажите «За публикацию в научном журнале, название журнала и серии»)
АО «Народный Банк Казахстана» ИИК KZ156010241000003308 БИК HSBKKZKX Кбе 16 Код 16 КНП 861	

ОБРАЗЕЦ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

МРНТИ 14.37.27

DOI xxxxxxxxxxxxxx

***С. К. Антикеева**
Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ СОЦИАЛЬНЫХ РАБОТНИКОВ ЧЕРЕЗ КУРСЫ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ

В данной статье представлена теоретическая модель формирования личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации, которая разработана в рамках докторской диссертации «Формирование личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации». В статье приводятся педагогические аспекты самого процесса моделирования, перечислены этапы педагогического моделирования. Представлены методологический, процессуальный (технологический) и инструментальный уровни модели, ее цель, мониторинг сформированности искомых компетенций, а также результат. В модели показаны компетентностный, личностно-ориентированный и практико-ориентированный педагогические подходы, закономерности, принципы, условия формирования выбранных компетенций; описаны этапы реализации процесса формирования, уровни сформированности личностных и профессиональных компетенций. В разделе практической подготовки предлагается интерактивная работа в системе слушатель-преподаватель-группа, подразумевающая личное участие каждого специалиста, а также открытие первого в нашей стране Республиканского общественного объединения «Национальный альянс профессиональных социальных работников». Данная модель подразумевает под собой дальнейшее совершенствование и самостоятельное развитие личностных и профессиональных компетенций социальных работников. Это позволяет увидеть в модели эффективность реализации курсов повышения квалификации, формы, методы и средства работы.

Ключевые слова: теоретическая модель, компетенции, повышение квалификации, социальные работники.

Введение

Социальная работа – относительно новая для нашей страны профессия. Поэтому обучение социальных работников на современной стадии не характеризуется наличием достаточно разработанных образовательных стандартов, которые находили бы выражение в формулировке педагогических целей, в содержании, технологиях учебного процесса.

Продолжение текста публикуемого материала

Материалы и методы

Теоретический анализ научной психолого-педагогической и специальной литературы по проблеме исследования; анализ законодательных и нормативных документов по открытию общественных объединений; анализ содержания программ курсов повышения квалификации социальных работников; моделирование; анализ и обобщение педагогического опыта; опросные методы (беседа, анкетирование, интервьюирование); наблюдение; анализ продуктов деятельности специалистов; эксперимент, методы математической статистики по обработке экспериментальных данных.

Продолжение текста публикуемого материала

Результаты и обсуждение

Чтобы понять объективные закономерности, лежащие в основе процесса формирования и развития личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации, необходимо четко представлять себе их модель.

Продолжение текста публикуемого материала

Выводы

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что теоретическая модель формирования личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации содержит три уровня ее реализации.

Продолжение текста публикуемого материала

Список использованных источников

1 **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование : сущность, эффективность и неопределенность [Текст] // Педагогика. – 2003. – № 4. – С. 22.

2 **Кузнецова, А. Г.** Развитие методологии системного подхода в отечественной педагогике : монография [Текст]. – Хабаровск : Изд-во ХК ИППК ПК, 2001. – 152 с.

3 **Каропа, Г. Н.** Системный подход к экологическому образованию и воспитанию (На материале сельских школ) [Текст]. – Минск, 1994. – 212 с.

4 **Штофф, В. А.** Роль моделей в познании [Текст] – Л. : ЛГУ, 1963. – 128 с.

5 **Таубаева, Ш.** Методология и методика дидактического исследования : учебное пособие [Текст]. – Алматы : Казак университеті, 2015. – 246 с.

6 **Дахин, А. Н.** Моделирование компетентности участников открытого образования [Текст]. – М. : НИИ школьных технологий 2009. – 290 с.

7 **Дахин, А. Н.** Моделирование в педагогике [Текст] // Идеи и идеалы. – 2010. – № 1(3). – Т. 2 – С. 11–20.

8 **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование : монография [Текст]. – Новосибирск : Изд-во НИПКиПРО, 2005. – 230 с.

9 **Аубакирова, С. Д.** Формирование деонтологической готовности будущих педагогов к работе в условиях инклюзивного образования : дисс. на соиск. степ. д-ра филос. (PhD) по 6D010300 – Педагогика и психология [Текст] – Павлодар, 2017. – 162 с.

10 **Арын, Е. М., Пфейфер, Н. Э., Бурдина, Е. И.** Теоретические аспекты профессиональной подготовки педагога XXI века : учеб. пособие [Текст]. – Павлодар : ПГУ им. С. Торайгырова; СПб. : ГАФКиС им. П. Ф. Лесгафта, 2005. – 270 с.

References

1 **Dahin, A. N.** Pedagogicheskoe modelirovanie : suschnost, effectivnost i neopredelennost [Pedagogical modeling : essence, effectiveness, and uncertainty] [Text]. In Pedagogy. – 2003. – № 4. – P. 22.

2 **Kuznetsova, A. G.** Razvitie metodologii sistemnogo podhoda v otechestvennoi pedagogike [Development of the system approach methodology in Russian pedagogy : monograph] [Text]. – Khabarovsk : Izd-vo KhK IPPK PK, 2001. – 152 p.

3 **Karopa, G. N.** Sistemnyi podhod к ecologicheskomu obrazovaniu i vospitaniu (Na materiale selskih shkol) [The systematic approach to environmental education and upbringing (Based on the material of rural schools)] [Text] – Minsk, 1994. – 212 p.

4 **Shtoff, V. A.** Rol modelei v poznanii [The role of models in cognition] [Text] – L. : LGU, 1963. – 128 p.

5 **Taubayeva, Sh.** Metodologiya i metodika didakticheskogo issledovaniya : uchebnoe posobie [Methodology and methods of educational research : a tutorial] [Text] – Almaty : Kazak University, 2015. – 246 p. c.

6 **Dahin, A. N.** Modelirovanie kompetentnosti uchastnikov otkrytogo obrazovaniya [Modeling the competence of open education participants] [Text] – Moscow : NII shkolnyh tehnologii, 2009. – 290 p.

7 **Dahin, A. N.** Modelirovanie v pedagogike [Modeling in pedagogy] [Text]. In Idei i idealy. – 2010. – № 1(3). – T. 2 – P. 11–20.

8 **Dahin, A. N.** Pedagogicheskoe modelirovanie : monographia [Pedagogical modeling : monograph] [Text]. – Novosibirsk : Izd-vo NIPKиPRO, 2005. – 230 p.

9 **Aubakirova, S. D.** Formirovaniye deontologicheskoi gotovnosti buduschih pedagogov к rabote v usloviyah inklusivnogo obrazovaniya : dissertaciya na soiskanie stepeni doctora filosofii (PhD) po specialnosti 6D010300 – Pedagogika i psihologiya. [Formation of deontological readiness of future teachers to work in inclusive education : dissertation for the degree of doctor of philosophy (PhD) in the specialty 6D010300- Pedagogy and psychology] [Text] – Pavlodar, 2017. – 162 p.

10 **Aryn, E. M., Pfeifer, N. E., Burdina, E. I.** Teoreticheskie aspekty professionalnoi podgotovki pedagoga XXI veka : ucheb. posobie [Theoretical aspects of professional training of a teacher of the XXI century : textbook] [Text] – Pavlodar : PGU im. S. Toraigyrov PSU; St.Petersburg. : GAFKiS im. P. F. Lesgafta, 2005. – 270 p.

С. К. Антикеева
Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

БІЛІКТІЛІКТІ АРТТЫРУ КУРСТАРЫ АРҚЫЛЫ ӘЛЕУМЕТТІК ҚЫЗМЕТКЕРЛЕРДІҢ ҚҰЗІРЕТТІЛІКТЕРІН ҚАЛЫПТАСТЫРУДЫҢ ТЕОРИЯЛЫҚ МОДЕЛІ

Бұл мақалада «Әлеуметтік қызметкерлердің біліктілігін арттыру курстары арқылы тұлғалық және кәсіби құзіреттіліктерін қалыптастыру» докторлық диссертация шеңберінде әзірленген біліктілікті арттыру курстары арқылы әлеуметтік қызметкерлердің тұлғалық және кәсіби құзыреттілігін қалыптастырудың теориялық моделі ұсынылған. Мақалада модельдеу процесінің педагогикалық аспектілері, педагогикалық модельдеудің кезеңдері келтірілген. Модельдің әдіснамалық, процессуалдық (технологиялық) және аспаптық деңгейлері, оның мақсаты, қажетті құзыреттердің қалыптасу мониторингі, сондай-ақ нәтижесі ұсынылған. Модельде құзыреттілікке, тұлғаға бағытталған және практикаға бағытталған педагогикалық тәсілдер, таңдалған құзыреттерді қалыптастыру заңдылықтары, қағидаттары, шарттары көрсетілген; қалыптасу

процесін іске асыру кезеңдері, жеке және кәсіби құзыреттердің қалыптасу деңгейлері сипатталған. Практикалық дайындық бөлімінде тыңдаушы-оқытушы-топ жүйесінде интерактивті жұмыс ұсынылады, ол әр маманның жеке қатысуын, сондай-ақ елімізде алғашқы «кәсіби әлеуметтік қызметкерлердің ұлттық альянсы» республикалық қоғамдық бірлестігінің ашылуын білдіреді. Бұл модель әлеуметтік қызметкерлердің жеке және кәсіби құзыреттерін одан әрі жетілдіруді және тәуелсіз дамытуды білдіреді. Бұл модельде біліктілікті арттыру курстарын іске асырудың тиімділігін, жұмыс нысандары, әдістері мен құралдарын көруге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: теориялық модель, құзыреттілік, біліктілікті арттыру, әлеуметтік қызметкерлер.

S. K. Antikeyeva
Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

THEORETICAL MODEL OF FORMATION COMPETENCIES OF SOCIAL WORKERS THROUGH PROFESSIONAL DEVELOPMENT COURSES

This article presents a theoretical model for the formation of personal and professional competencies of social workers through advanced training courses, which was developed in the framework of the doctoral dissertation «Formation of personal and professional competencies of social workers through advanced training courses». The article presents the pedagogical aspects of the modeling process itself, and lists the stages of pedagogical modeling. The methodological, procedural (technological) and instrumental levels of the model, its purpose, monitoring the formation of the required competencies, as well as the result are presented. The model shows competence-based, personality-oriented and practice-oriented pedagogical approaches, patterns, principles, conditions for the formation of selected competencies; describes the stages of the formation process, the levels of formation of personal and professional competencies. The practical training section offers interactive work in the listener-teacher-group system, which implies the personal participation of each specialist, as well as the opening of the first Republican public Association in our country, the national Alliance of professional social workers. This model implies further improvement and independent development of personal and professional competencies of social workers. This allows you to see

in the model the effectiveness of the implementation of advanced training courses, forms, methods and means of work.

Keywords: theoretical model, competencies, professional development, social workers.

Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Антикеева Самал Канатовна «Педагогика және психология» мамандығы бойынша докторант «Торайғыров университеті» КЕАҚ, Гуманитарлық және әлеуметтік ғылымдар факультеті, Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Антикеева Самал Канатовна докторант по специальности «Педагогика и психология» НАО «Торайгыров университет», Факультет гуманитарных и социальных наук, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Samal Kanatovna Antikeyeva doctoral student in «Pedagogy and psychology» «Toraighyrov University» NCJSC, Faculty of Humanities and Social Sciences, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00

ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА НАУЧНЫХ ЖУРНАЛОВ «ВЕСТНИК ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА», «КРАЕВЕДЕНИЕ», «НАУКА И ТЕХНИКА КАЗАХСТАНА»

Редакционная коллегия журналов «Вестник Торайгыров университет», «Краеведение» и «Наука и техника Казахстана» в своей работе придерживается международных стандартов по этике научных публикаций и учитывает информационные сайты ведущих международных журналов.

Редакционная коллегия журнала, а также лица, участвующие в издательском процессе в целях обеспечения высокого качества научных публикаций, во избежание недобросовестной практики в публикационной деятельности (использование недостоверных сведений, изготовление данных, плагиат и др.), обеспечения общественного признания научных достижений обязаны соблюдать этические нормы и стандарты, принятые международным сообществом и предпринимать все разумные меры для предотвращения таких нарушений.

Редакционная коллегия ни в коем случае не поощряет неправомерное поведение (плагиат, манипуляция, фальсификация) и приложит все силы для предотвращения наступления подобных случаев. В случае, если редакционной коллегии станет известно о любых неправомерных действиях в отношении опубликованной статьи в журнале или в случае отрицательного результата экспертизы редколлегий статья отклоняется от публикации.

Редакционная коллегия не должна раскрывать информацию о принятых к опубликованию рукописей третьим лицам, не являющимся рецензентами, потенциальными рецензентами, членами редакционной коллегии, работниками типографии. Неопубликованные данные, полученные из рукописей, не должны использоваться в личных исследовательских целях без письменного разрешения автора.

Ответственность экспертов (рецензентов)

Рецензенты должны давать объективные суждения и указывать на соответствующие опубликованные работы, которые еще не цитируются. К рецензируемым статьям следует обращаться конфиденциально. Рецензенты будут выбраны таким образом, чтобы не было конфликта интересов в отношении исследования, авторов и / или спонсоров исследования.

Ответственность авторов

Ответственность за содержание работы несет автор. Авторы обязаны вносить исправления, пояснения, опровержения и извинения, если такие имеются.

Автор не должен представлять статью, идентичную ранее опубликованной в другом журнале. В частности, не принимаются переводы на английский либо немецкий язык статей, уже опубликованных на другом языке.

В случае обнаружения в рукописи статьи существенных ошибок автор должен сообщить об этом редактору раздела до момента подписи в печать оригинал-макета номера журнала. В противном случае автор должен за свой счет исправить все критические замечания.

Направляя статью в журнал, автор осознаёт указанную степень персональной ответственности, что отражается в письменном обращении в редакционную коллегию Журнала.

Теруге 07.09.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2026 ж. қол қойылды.
Электронды баспа
19,0 Mb RAM
Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: Шукитова А. Б.
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас
Тапсырыс № 4601

Сдано в набор 07.09.2026 г. Подписано в печать 30.09.2026 г.
Электронное издание
19,0 Mb RAM
Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.
Компьютерная верстка: Шукитова А. Б.
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас
Заказ № 4601

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
67-36-69
E-mail: kereku@tou.edu.kz
www.vestnik-energy.tou.edu.kz