

Университеттің 50 жылдығына арналған
**«ЭНЕРГЕТИКА, ИНФОКОММУНИКАЦИЯЛЫҚ
ТЕХНОЛОГИЯЛАР ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ»**
XIII Халықаралық ғылыми-техникалық конференция
материалдары

Материалы
XIII Международной научно-технической конференции
**«ЭНЕРГЕТИКА, ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ»**
приуроченной к 50 летию университета

Proceedings
XIII International Scientific and Technical Conference
**«ENERGY, INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGIES
AND HIGHER EDUCATION»**
dedicated to the 50th anniversary of the University

Том 1

22–24 октября
Алматы, 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
ҒҰМАРБЕК ДӘУКЕЕВ АТЫНДАҒЫ
АЛМАТЫ ЭНЕРГЕТИКА ЖӘНЕ БАЙЛАНЫС УНИВЕРСИТЕТІ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ
ИМЕНИ ГУМАРБЕКА ДАУКЕЕВА

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
ALMATY UNIVERSITY OF POWER ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS
NAMED AFTER GUMARBЕК DAUKEYEV

Университеттің 50 жылдығына арналған
**«ЭНЕРГЕТИКА, ИНФОКОММУНИКАЦИЯЛЫҚ
ТЕХНОЛОГИЯЛАР ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ»**
XIII Халықаралық ғылыми-техникалық конференция
материалдары
22–24 қазан, Алматы, 2025

Материалы
XIII Международной научно-технической конференции
**«ЭНЕРГЕТИКА, ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ»**
приуроченной к 50 летию университета
22–24 октября, Алматы, 2025

Proceedings
XIII International Scientific and Technical Conference
**«ENERGY, INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGIES
AND HIGHER EDUCATION»**
dedicated to the 50th anniversary of the University
22–24 October, Almaty, 2025

Том 1

Алматы, 2025

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Алипбаев К.А. (PhD, доцент, Проректор по науке, председатель), Калиева Н.Б. (PhD, заместитель председателя), Сулейменова А.Б., Жандаулетова Ф.Р., Ермекбаев М.М., Оразалы Е.Е., Ногайбаева М.О. (ответственный секретарь конференции)

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель: Ныгыметов Гани Сактаганович, Ректор Алматинского университета энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева

Заместитель председателя: Алипбаев Куаныш Арингожаевич, PhD, доцент, Проректор по науке

Члены международного программного комитета: Ali Çoruh (PhD, проф., Турция), Erwin Halim (PhD, ассоц. профессор, Индонезия), R. Ramakrishnan (PhD, ассоц. профессор, Индия), Шерьязов С.К. (д.т.н., проф., Российская Федерация), Карпенко А.П. (д.ф.м.н., проф., Российская Федерация), Марковский В.П. (к.т.н., проф., Казахстан), Бердибаев Р.Ш. (к.т.н., ассоц. профессор, Казахстан), Омарбекова А.О. (PhD, Казахстан), Эмитов Е.Т. (PhD, ассоц., Казахстан), Гнатюк С.А. (д.т.н., проф., Украина), Одарченко Р.С. (д.т.н., проф., Украина), Elhadj Benkhelifa (PhD, проф., Англия), Жантикин Т.М. (д.ф.м.к., Казахстан), Утепбергенов И.Т. (д.т.н., профессор, Казахстан), Овчинникова Т.И. (д.т.н., доцент, Российская Федерация), Абжанова Л.К. (PhD, ассоц. профессор, Казахстан), Тойбаева Ш.Д. (PhD, ассоц. профессор, Казахстан), Бегимбаева Е.Е. (PhD, ассоц. профессор, Казахстан), Коробков М.С. (PhD, Казахстан), Абикенова А.А. (к.т.н., доцент, Казахстан), Қадылбекқызы Э. (PhD, Казахстан), Нұрғизат Е. (PhD, ассоц. профессор, Казахстан), Умбеткулов Е.К. (к.т.н., ассоц. профессор, Казахстан), Утешкалиева Л.Ш. (к.т.н., доцент, Казахстан), Доскожанова А.Б. (PhD, ассоц. профессор, Казахстан)

Э65 **«Энергетика, инфокоммуникациялық технологиялар және жоғары білім» XIII Халықаралық ғылыми-техникалық конференция / XIII Международная научно-техническая конференция «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование» / XIII International Scientific and Technical Conference «Energy, infocommunication technologies and higher education»:** – Алматы: АУЭС, 2025. – В 2 томах. – **Том 1.** – 594 с. – Каз., рус., англ.

ISBN 978-601-358-122-4 (том 1)
ISBN 978-601-358-120-0

Сборник включает статьи ведущих ученых, профессорско-преподавательского состава, молодых исследователей Республики Казахстан, России, Германии, Польши, Латвии, Украины, Туркменистана, Таджикистана, Узбекистана, Кыргызстана. В материалах рассмотрены актуальные вопросы электроэнергетики, теплоэнергетики, телекоммуникационных и космических технологии, робототехники, информационных технологии, системы управления и кибербезопасности.

ISBN 978-601-358-120-0

УДК 001
ББК 72
© АУЭС, 2025

НАПРАВЛЕНИЕ «ЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА»

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: ЛЮДИ, ТЕХНОЛОГИИ, ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Хайрушев Жакып Галиевич

Председатель Общественного совета при Министерстве энергетики РК,
Управляющий директор Национальной палаты предпринимателей «Атамекен»

Добрый день, уважаемые коллеги, преподаватели, студенты, гости конференции.

Прежде всего хочу поблагодарить организаторов за приглашение и еще раз поздравить наш родной университет с 50-летием. За эти полвека АУЭС стал не просто вузом, а настоящей кузницей инженерной школы страны. Его выпускники работают на всех крупных энергетических объектах Казахстана, и я с гордостью отношу себя к их числу.

Сегодняшняя конференция очень символична. Мы живем в момент, когда энергетика, образование и технологии буквально переплелись. Энергетика уже не может существовать без цифровых решений, а цифровизация невозможна без инженеров.

Свой доклад я разбил на 5 условных блоков.

Блок 1. Энергетика на пороге структурной перестройки

Если коротко о главном, то мы все видим, что мир вступил в эпоху структурной перестройки энергетики. Это не просто тренд, а реальность, которая уже идёт по всем странам.

За последние десять лет мировое потребление электроэнергии выросло более чем на 30 процентов. И это не предел. Электромобили, дата-центры, системы водоснабжения, «умные» города - всё работает на электричестве. Энергия становится не просто ресурсом, а новой валютой развития.

Одновременно усиливается зависимость от климата. Засушливые годы снижают выработку ГЭС, АЭС снижают свою выработку из-за недостаточного количества охлаждения, жаркое лето перегружает сети, ветра и солнце дают нестабильную генерацию. Система, созданная в середине прошлого века, не рассчитана на такие колебания.

Третья реальность – это кибербезопасность. Электроэнергетика уже не защищена трансформаторной будкой, всё управляется цифрой. Один неверный код может обесточить целый регион.

И, наконец, оборудование. Большая часть энергетических мощностей Казахстана эксплуатируется по 40–50 лет. То есть фактически мы живём сегодня на наследии советской эпохи. Да, мы её поддерживаем, ремонтируем, модернизируем, но вопрос уже не в ремонте. Мы подошли к моменту, когда

чинить старую систему недостаточно. Уже требуется эту архитектуру отрасли капитально пересобирать.

Архитектуру в широком смысле. Это не только станции и сети. Это структура собственности, тарифная политика, модели стимулирования инвестиций, правила рынка, подготовка кадров. Все эти элементы должны быть увязаны в единую систему, где приоритетом станет не латание дыр, а устойчивое развитие и технологическая независимость. И здесь Казахстан не исключение.

Мы в Казахстане также видим ежегодный рост потребления, про износ активов не знает разве что младенец, в определенные часы имеется ограниченность резервов мощности и дефицит маневренных мощностей.

При этом, я хочу сказать, что все это не повод для паники, это повод для новой философии. Это своего рода новый вызов для нашей отрасли.

Блок 2. Цифровая трансформация — инструмент выживания энергетики

К сожалению, сегодня большая часть нашей энергетики остаётся аналоговой. В ней всё ещё многое держится на человеке, опыте и интуиции. И когда мы говорим о «цифровой энергетике», то откровенно нужно признать, в реальности имеем в виду энергетику будущего, как минимум тридцатых годов этого века. Мы пока только начинаем к ней путь.

Когда звучит фраза «структурная перестройка отрасли», обычно представляют строительство новых станций и сетей. Но, на самом деле, суть не в этом. Мы не можем в одночасье демонтировать всё, что создавалось десятилетиями. Поэтому главная задача сегодня - это научиться управлять тем, что уже работает, но управлять по-новому.

Да, старое оборудование не станет цифровым, но вокруг него можно выстроить новый контур управления, т.е. систему, которая *видит, анализирует и предупреждает*. Не тогда, когда у турбины уже растёт уровень вибрации, подшипники перегреваются или на котле появляется свищ, а заранее, через систему цифрового наблюдения и предиктивной аналитики. Это датчики, которые фиксируют малейшие отклонения, и алгоритмы, которые распознают зарождающуюся проблему по изменениям вибрации, температуры, давления.

Такие примеры уже есть. На Павлодарской ТЭЦ-2, Аксуской ГРЭС и ряде других станций внедряются системы предиктивного мониторинга, которые позволяют *предупредить* аварийные ситуации, а не просто фиксировать их последствия. Уверен, не за горами и цифровые обходчики и роботы ремонтники.

Это и есть первый шаг к настоящей цифровой энергетике.

Цифровизация – это ведь не просто «навесить датчики на старое железо», а сменить философию эксплуатации, т.е. работать не по факту поломки, а по прогнозу, не тушить последствия, а управлять рисками заранее. Вот где начинается настоящая перестройка энергетики.

Цифровая энергетика - это не только «умные счётчики» и красивые дашборды. Это способность видеть всю систему в реальном времени от крупной

генерации до розетки у потребителя. Это новые алгоритмы балансирования, прогнозирование нагрузки, автоматическое распределение мощности и точный анализ потерь.

Сегодня цифра - это уже вопрос выживания отрасли. Когда сеть не умеет предсказывать пики потребления, то случаются аварии, когда компания не знает, где у неё потери - она теряет деньги, а когда регулятор не видит полной картины в отрасли, то невозможно управлять тарифами и инвестициями.

Мы все знаем, что в Казахстане запущен Национальный проект «Модернизация энергетического и коммунального секторов» с понятным бюджетом и горизонтом до 2029 года. Однако парадокс в том, что далеко не все энергетические компании проявили интерес к участию в нём. Очередей за средствами нет, активного движения тоже. Почему так? Причина, как мне кажется, проста - инерция мышления. Многие привыкли работать по старым схемам: «нас всё устраивает, цифра не нужна, потери и так заложены в тариф».

И пока такая логика живёт, никакая модернизация не заработает. А ведь в этом проекте реальный шанс перейти от слов о цифровизации к делу. Создать прозрачные механизмы учёта, мониторинга, энергосбережения, где данные нельзя “подправить” под нужный результат. И, давайте скажем честно, в этой инертности есть место и злоупотреблениям. Когда нет прозрачности данных, всегда возникает соблазн скрыть потери, приписать объёмы, отложить модернизацию.

Цифра всё это убирает - она либо работает, либо нет. И, возможно, именно поэтому некоторым до сих пор комфортнее без неё.

Следующий шаг - это распространить эту логику на всю энергосистему. Это внедрение цифровых двойников объектов, единых систем мониторинга сетей, предиктивной диагностики оборудования, интеграции с платформами *egov-business*. Энергосистема должна стать единым живым организмом, управляемым в реальном времени.

И ещё один важный момент - цифровизация отрасли все-таки должна стремиться к локальным решениям. Если мы просто купим готовые импортные системы, зависимость от внешних поставщиков только усилится.

Вот вчера и сегодня проходит крупная выставка в Алматы и вместе с ней форум энергетиков, где демонстрируются и говорится о развитии отечественного производства и здесь очень много казахстанских решений.

Поэтому ставка должна быть сделана на казахстанских инженеров и производителей, которые умеют адаптировать технологии под наши условия — климат, сетевые режимы, нормативную базу. Вот что означает цифровая суверенность. И именно она должна стать основой новой архитектуры отрасли.

Блок 3. Человеческий капитал — главный ресурс энергетики будущего

Можно построить любую станцию, внедрить цифровую платформу, привлечь инвестора, но, если нет людей, способных этим управлять, то я уверен,

ничего не получится. Технологии — это лишь инструмент. Всё решают люди, их мышление, их школа.

Сегодня энергетике нужны не просто инженеры в классическом понимании. Нужны специалисты, которые умеют читать чертёж и код, понимают и физику, и экономику, и логику цифровых процессов. Фактически — инженеры нового типа.

И здесь роль АУЭС — ключевая. За 50 лет университет дал стране тысячи специалистов, и именно выпускники АУЭС сегодня управляют электростанциями, модернизируют сети, создают программные решения для отрасли. Но время требует новых форматов.

Убежден, что современное образование должно стать практико-ориентированным. То, что студент изучает сегодня, уже завтра должно находить применение на действующем объекте. И наоборот — реальные производственные задачи должны возвращаться в университет как кейсы и исследовательские темы.

Мы в НПП «Атамекен» совместно с бизнес-сообществом уже начали двигаться в этом направлении. Сегодня совместно с АУЭС мы начали формировать модель «Smart Energy University» — когда бизнес, наука и образование объединяются в единую экосистему. Где студент проходит путь от теории до реального проекта, т.е. изучает технологию, решает производственную задачу, защищает её как инженерное решение и сразу получает приглашение на работу.

Только так рождается живая связь между учебной аудиторией и подстанцией, между лабораторией и производством.

Кроме того, важно вернуть престиж инженерной профессии. Пока молодёжь массово уходит в юриспруденцию и финансы, энергетика должна показать, что это не «старая» отрасль, а фундамент будущего. Инженер сегодня - это не человек с гаечным ключом, а создатель цифрового мира, от которого зависит стабильность страны.

И вот здесь юбилей АУЭС прекрасный повод подумать не только о прошлом, но и о будущем. Как сохранить инженерную школу, передать опыт, но при этом обновить подходы к обучению. Чтобы выпускник не просто знал формулы, а понимал, как их применить в реальной экономике и энергетике Казахстана.

Блок 4. Наука простых вещей и технологическая независимость

Мы часто говорим о высоких технологиях, инновациях, искусственном интеллекте. Это всё важно, но энергетика держится не только на сложных идеях она держится, в том числе, на **науке простых вещей**.

Что это значит? Это когда инженер ищет не «революцию», а **эффективность в деталях**, т.е. как уменьшить потери, повысить КПД, продлить срок службы оборудования, оптимизировать расход топлива. Такие вещи не делают заголовков в новостях, но именно они дают устойчивость системе.

У нас в Казахстане есть мощная основа для этой «науки простых вещей».

И вот здесь университету, я думаю, важно опираться не только на теорию, но и на тех, кто ежедневно решает или решал эти задачи на реальном производстве. Практикующий инженер может рассказать студентам не только *как должно быть*, но и *как бывает на самом деле*. Это и есть живая связь между наукой и реальной энергией страны.

Так рождается настоящая инженерная школа - не оторванная от жизни, а дышащая производством. И результаты этого подхода уже видны - на наших заводах уже производят оборудование, которое раньше полностью завозили из-за рубежа.

Например, завод Karlskrona - это современные насосы, Вёмер - запорная арматура мирового уровня, Сайман и НЕРО - интеллектуальные приборы учёта, про Алагеум мы все уже знаем и так далее.

Это не просто примеры локализации. Это **признаки формирования индустриальной экосистемы**, которая поддерживает энергетику на собственных ногах. Каждый такой завод - это десятки инженеров, конструкторов, наладчиков, программистов. И каждый их продукт результат нашей инженерной школы.

Но чтобы это работало системно, нужно одно - **связать науку, производство и рынок**. Чтобы университет разрабатывал решения, заводы их внедряли, а энергетические компании включали их в свои проекты и инвестиционные тарифы. Тогда инновация перестаёт быть «на бумаге» и превращается в оборудование на реальном объекте.

Такой подход даёт эффект, который мы называем **мультипликатором энергетики**, т.е. каждый тенге инвестиций в энергетику создаёт заказы в машиностроении, металлургии, IT, строительстве. То есть развивает всю экономику, а не только энергосектор.

Наука простых вещей - это и философия, и стратегия. Не ждать чуда извне, а **расти изнутри**, шаг за шагом, проект за проектом, завод за заводом. Так строится технологическая независимость. И именно с таких вещей начинается «новая энергетика Казахстана».

Блок 5. Взгляд в будущее: архитектура новой энергетики Казахстана

Если взглянуть вперёд, становится ясно: энергетика Казахстана стоит на пороге крупнейшего обновления за последние десятилетия. И вопрос уже не в том, нужны ли нам новые источники энергии. Вопрос в другом, какими они будут, кто их построит и кто ими будет управлять.

Будущее отрасли - это сбалансированная генерация. Где наряду с традиционными станциями появятся новые центры мощности, такие как атомные, гидроаккумулирующие, газотурбинные и возобновляемые с системами накопления энергии. Их задача не конкурировать, а дополнять друг друга, создавая устойчивость всей нашей Единой энергосистемы.

Строительство АЭС, развитие ГАЭС, внедрение ВИЭ - это не разрозненные шаги. Это элементы новой энергетической архитектуры, в которой главная ценность - управляемость и надёжность. Без ГАЭС не будет балансировки атомной и возобновляемой генерации. Без атомной — не будет стабильности в пиковые периоды. Без цифровизации — не будет прозрачности и доверия между участниками рынка.

Но ни одна из этих технологий не заработает без человека и доверия к его компетенции. Ведь любой алгоритм начинается с инженера, который его создаёт. Поэтому настоящая реформа энергетики - это не только инфраструктурный, но и человеческий проект. Проект, где на первом месте не мегаватты, а профессионализм, ответственность и национальная школа инженерии.

Мы часто говорим о будущем как о чём-то далёком, но оно начинается здесь и сейчас — с конкретных решений, с конкретных людей. Если каждый энергетик, каждый преподаватель, каждый студент сделает чуть больше, чем от него ждут — система изменится.

И тогда Казахстан сможет сказать: мы не просто потребляем энергию, мы создаём её — для развития, для поколений, для страны.

Пятьдесят лет для университета - это не возраст, это зрелость. А для энергетики - момент нового выбора. Сегодня АУЭС не просто празднует юбилей, а открывает новую страницу своей миссии — готовить инженеров не прошлого, а будущего.

Я искренне верю, что через десять лет мы будем говорить не только о модернизации ТЭЦ или строительстве АЭС, а о новой инженерной культуре Казахстана - современной, уверенной и созидательной.

Спасибо, родной университет.

С юбилеем, и — вперёд, к новым 50 годам.

СЕКЦИЯ 1 «ЦИФРОВАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: SMART GRID ТЕХНОЛОГИИ»

UDC 621.316.925:004.7

REMOTE MONITORING SYSTEM FOR REACTIVE POWER COMPENSATION USING IOT TECHNOLOGIES

Rakhmonov I., Atajiyev Sh.*

Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent,
Uzbekistan

*e-mail: mr.shoh.mr@gmail.com

1 Introduction

In electric power supply systems, traditional methods of reactive power compensation are most often implemented by means of relay-based automatically controlled capacitor banks. Although these methods are simple and inexpensive, they present several significant limitations. They cannot adequately adapt to rapid load variations, which results in abrupt reductions of the power factor; their efficiency decreases considerably under nonsinusoidal operating conditions where harmonic distortions are present; remote monitoring capability is restricted, with functionality largely confined to local measurements and on-site control; and frequent switching operations accelerate the wear of capacitors, often leading to premature failures. For these reasons, modern power systems increasingly require compensation devices equipped with digital control strategies and integrated with remote monitoring capabilities. In recent years, Internet of Things (IoT) technologies have been widely introduced in the energy sector, providing a new paradigm for smart grid development. With IoT-enabled devices it becomes possible to collect and remotely observe in real time such critical electrical parameters as current, voltage, power factor, active, reactive and apparent power. The acquired data can be stored on various cloud-based platforms and subsequently processed through analytical software for pattern recognition, anomaly detection, and predictive maintenance. In this way, compensation system operation can be automated and optimized by means of advanced algorithms, while capacitor banks or other compensation equipment may be remotely managed to enhance overall efficiency and reliability. Thus, IoT technologies embed intelligent monitoring and control functions into energy infrastructures, overcoming the inherent limitations of conventional relay-based compensation approaches, while simultaneously improving energy efficiency, power quality, and long-term system stability.

2 Main Text

Figure 1 presents a system developed on the basis of the **ESP8266 (NodeMCU V3) microcontroller**, which is specifically designed to perform **automatic reactive power compensation** in low-voltage power distribution networks. The primary function of this system is to continuously monitor load conditions, analyze power quality parameters, and dynamically control the switching of capacitor banks in order to improve the overall power factor of the electrical system.

To achieve accurate real-time measurement, the system employs a **voltage sensor (ZMPT101B)** and a **current sensor (ACS712)**. These sensors capture the instantaneous values of voltage and current, which are then processed by the NodeMCU microcontroller. Using these data, the controller computes the **phase displacement angle** between the voltage and current waveforms. Based on this calculation, the **power factor ($\cos \phi$)** is determined with sufficient accuracy for practical compensation purposes.

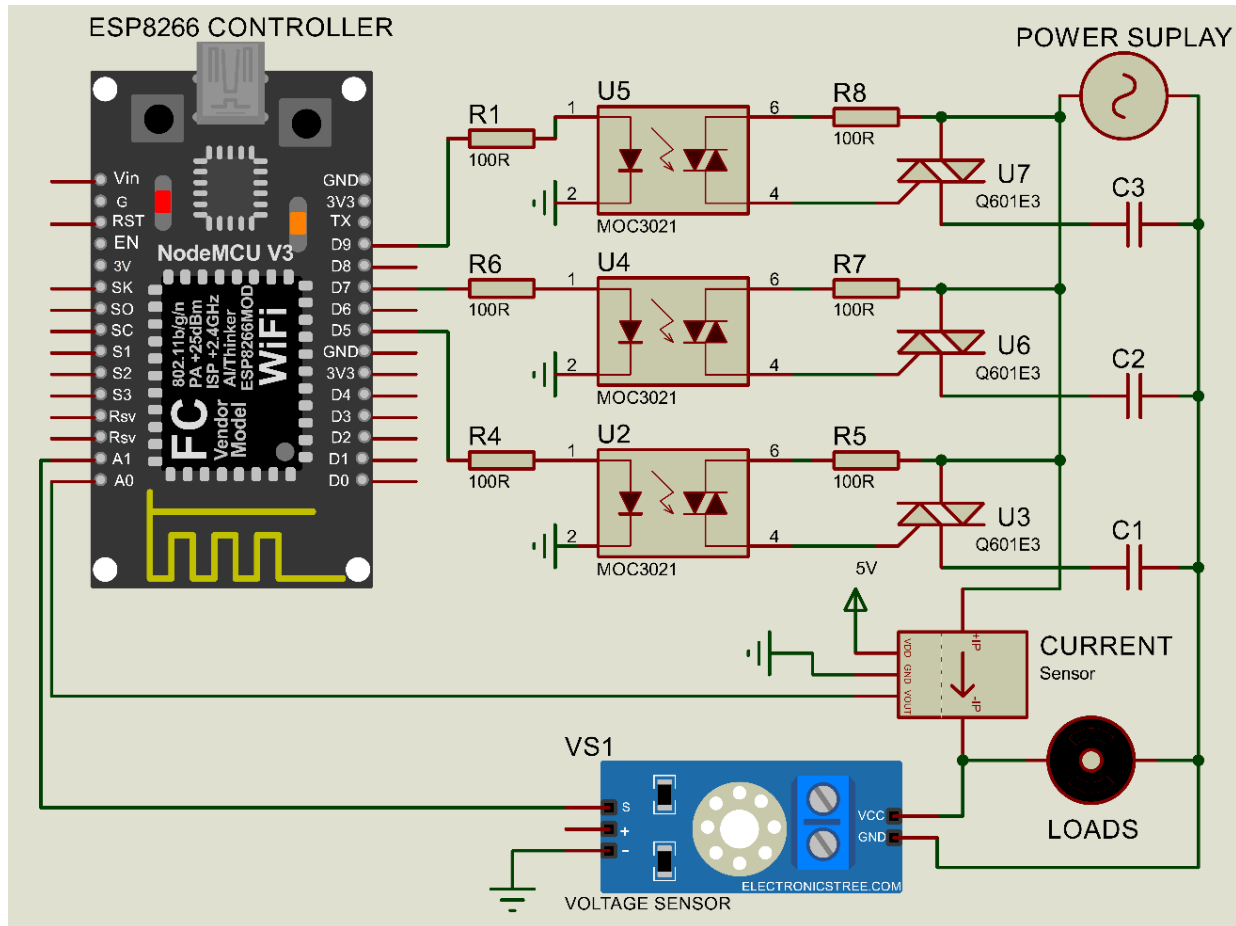


Fig. 1 - IoT-Based Automatic Reactive Power Compensation System Simulated in Proteus

When the measured power factor falls below a predetermined reference threshold, the system initiates a compensation procedure. The NodeMCU generates control signals that are applied to **MOC3021 opto-triac drivers**, which in turn activate **Q601E3 thyristors**. These thyristors are responsible for switching the **capacitor**

banks (C1, C2, C3) into the network. The introduction of the capacitor banks provides the necessary leading reactive power to offset the lagging reactive component caused by inductive loads such as motors, transformers, or fluorescent lighting systems.

This compensation mechanism results in a significant reduction of reactive power flow through the supply lines, thereby improving the effective power factor. As the power factor increases, the system enhances energy efficiency, reduces line losses, and improves the voltage stability of the grid. Moreover, the automatic nature of the control eliminates the need for manual intervention and ensures continuous optimization of the compensation level.

The proposed schematic has been fully simulated in the **Proteus environment**, where the functional interaction of all components has been rigorously tested and verified. The simulation results demonstrate that the **NodeMCU (ESP8266) microcontroller** is capable of acquiring sensor signals in real time and reliably controlling the capacitor banks in accordance with the calculated power factor. This confirms the operational feasibility of the system in dynamic load conditions, highlighting its robustness and accuracy.

A particularly significant aspect of the design is its integration with **Internet of Things (IoT) technology**. Through the built-in Wi-Fi module of the ESP8266, the system transmits measured electrical parameters—including voltage, current, active and reactive power, and the power factor ($\cos \phi$)—to various cloud-based platforms such as **ThingSpeak, Blynk, or MQTT servers**. This capability extends the functionality of the compensator beyond conventional automatic controllers: users are able to **remotely monitor** system parameters via smartphones or computers, and, when required, exercise **manual supervisory control** from remote locations. Such IoT-based integration represents a step toward modern **smart energy management frameworks**, where monitoring and control are seamlessly connected through digital communication channels.

Within this system, the **voltage sensor (ZMPT101B)** and the **current sensor (ACS712)** provide analog measurement signals corresponding to the load conditions. These signals are routed to the analog input (A0) and supplementary GPIO pins of the NodeMCU. The microcontroller then applies computational algorithms to determine the **phase displacement angle** between the current and voltage waveforms, from which the power factor ($\cos \phi$) is derived. Should the computed power factor fall below a predefined threshold (e.g., 0.9 or 0.95), the ESP8266 activates its digital outputs (D5, D7, and D9), which in turn trigger the **MOC3021 opto-isolators**. These opto-isolators safely drive the **thyristors (Q601E3)**, thereby connecting the appropriate stages of the **capacitor banks (C1, C2, C3)** to the grid. The staged switching process ensures that only the necessary reactive power compensation is applied, thus preventing over-compensation and optimizing the system response.

The complete simulation in Proteus validates not only the hardware design but also the **control algorithm**. The results confirm that the ESP8266-based controller can execute the compensation procedure with precision, while simultaneously streaming real-time data to IoT platforms. This dual capability—**local automatic compensation**

combined with **remote IoT-enabled monitoring and control**—substantially increases the system’s versatility and potential applications.

From an industrial perspective, the integration of IoT with reactive power compensation contributes to improved **energy efficiency**, reduction of **line and transformer losses**, and enhancement of **voltage stability** in power networks. Moreover, the availability of real-time monitoring data facilitates predictive maintenance, operational analytics, and more informed decision-making processes in smart grid environments. The ability to remotely adjust or supervise the system provides significant operational flexibility, which is particularly relevant for distributed industrial facilities and utility providers.

List of references

1. Usmanov E.G. Reactive Power Compensation. – 2023.
2. Kabishev A.V. Reactive Power Compensation in Electrical Installations of Industrial Enterprises. – 2012.
3. Samuleev V.I. Reactive Energy Compensation in Power Systems. – Veliky Novgorod: FSBEI HE “VGUWT”, 2019.
4. Hofmann W., Schlabbach J., Just W. Reactive Power Compensation: A Practical Guide. – Wiley-VCH, 2014. – 368 p.
5. Kumar N., Mallick P.K., Tripathi A. IoT Applications in Smart Grid: A Comprehensive Survey. – IEEE Internet of Things Journal. – 2020. – Vol. 7, No. 5. – p. 4672–4687.
6. Akbarov F.A., Atajiyev Sh.M., Boqijonov U.A. Development of a device for remote control of pumps in agriculture. – Actual Problems of Digitization in Electrical Mechanical and Electrical Technological Systems, dedicated to the bright memory of Doctor of Technical Sciences, Professor Khashimov A.A. and Khabibullayeva T.N. – May 21–22, 2024.
7. Rakhmonov I.U., Atajiyev Sh.M. Analysis of reactive power control methods and current state. – International Scientific and Practical Conference «XVII Saginov readings. Integration of education, science and production». – 2025.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКОВОГО РЕЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО СТЕНДА В СРЕДЕ ВИЗУАЛЬНОГО ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ FLPROG

Давранов А. И., Зенченко А. Ю., Нигматуллин Р. М., Агимов Т.Н.

Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы,
Казахстан

e-mail: a.davranov@aues.kz

Введение

В статье рассматривается проектирование и реализация токового реле на базе Аппаратно-программируемого стенда АПС_1 с использованием среды визуального программирования FLProg. Подробно анализируются этапы разработки: измерение тока с помощью датчика ACS712 [1], организация пользовательского меню, настройка уставок максимальной токовой защиты (МТЗ) и алгоритм срабатывания при аварийных режимах [2]. Представлены схемы и экраны интерфейса, полученные в ходе моделирования. Разработанная методика может быть применён в системах релейной защиты противоаварийной автоматики, а также в образовательных целях в ВУЗах для магистрантов и докторантов при выполнении диссертационных работ.

Эффективность и надёжность работы энергосистемы во многом определяется качеством функционирования релейной защиты. В условиях роста нагрузок, интеграции возобновляемых источников энергии и усложнения конфигурации электрических сетей возрастает роль микропроцессорных устройств управление и релейной защиты [3].

Токовые реле являются одним из ключевых элементов таких систем. Их задача — обнаружение аварийного режима по превышению заданных значений тока и отключение повреждённого участка сети. Современные схемные решения позволяют не только выполнять защитные функции, но и обеспечивать визуализацию параметров, удобную настройку уставок и интеграцию в автоматизированные системы управления сетями [4].

Для проектирования подобных устройств всё чаще применяются среды визуального программирования, позволяющие создавать алгоритмы без прямого написания кода. Одним из таких инструментов является программа **FLProg**, обеспечивающая работу с микроконтроллерами Arduino и совместимыми платформами [5].

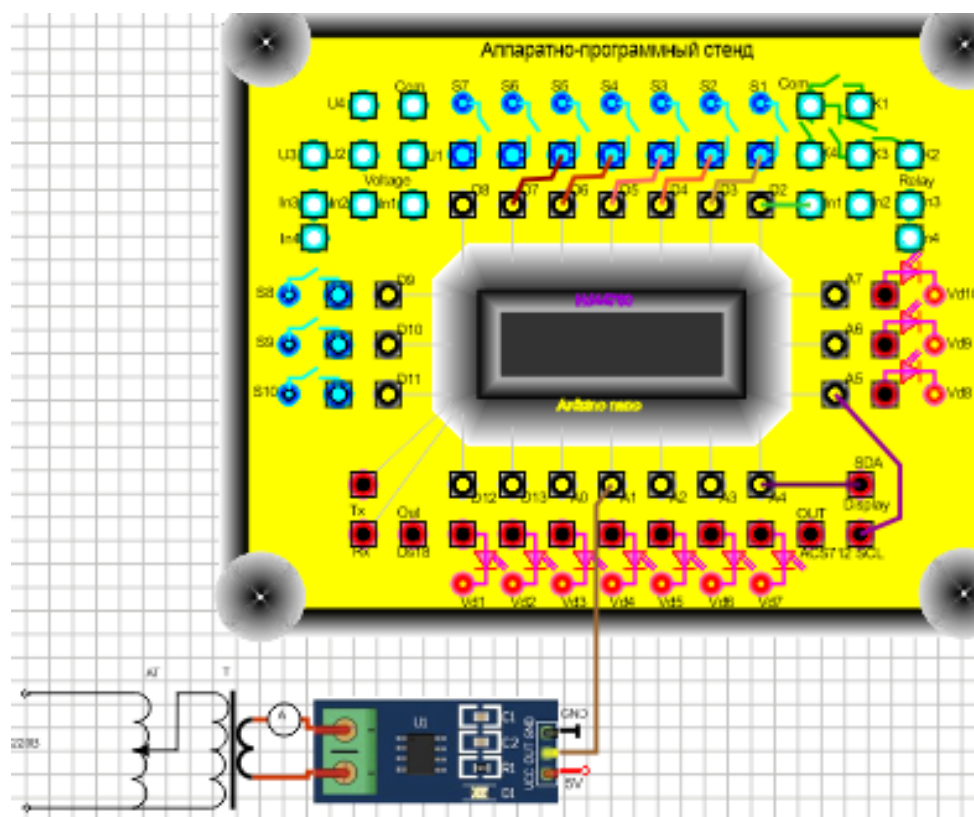


Рисунок 1 – схема подключения датчика тока ACS712 к АПС

Методика проектирования токового реле

В данной работе выполнена разработка токового реле в программной среде **FLProg** с использованием датчика тока **ACS712**. Структура исследования разделена на несколько функциональных блоков («плат»), каждая из которых выполняет отдельную задачу:

- **Старт** – инициализация системы, вывод стартовой информации.
- **Измерение** – считывание и калибровка тока.
- **Меню** – настройка уставок МТЗ.
- **Срабатывание** – логика аварийного отключения.
- **Отображение меню** – визуализация данных на дисплее.

Датчик **ACS712** используется для контроля тока в реальном времени. Его сигнал оцифровывается, масштабируется с помощью коэффициента калибровки и передаётся в переменную функцию, доступную для сравнения и отображения.

Среда **FLProg** предоставляет удобный интерфейс для связывания блоков: математических, логических, таймеров и интерфейсных элементов.

Описание структуры исследований

Плата «Старт»

На начальном этапе работы устройства выводится информация об авторе и названии проекта. Для этого используется одновибратор, формирующий логический сигнал длительностью 4 секунды. За это время на дисплее отображается стартовое сообщение.

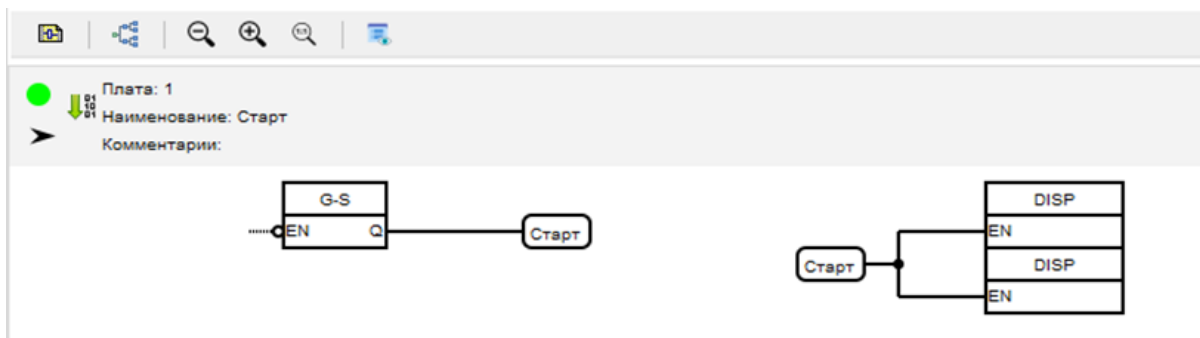


Рисунок 2 – Стартовый экран модели

Плата «Измерение»

Блок «Измерение» основан на датчике **ACS712**, который позволяет контролировать значения тока. Для корректного отображения выполняется калибровка через математический блок с коэффициентом 2,9 (показано на рисунке 3)

Полученное значение от математического блока сохраняется в переменном элементе в разделе <Теги> и преобразуется в строку для вывода на дисплей. Таким образом, оператор может наблюдать текущее значение тока в амперах

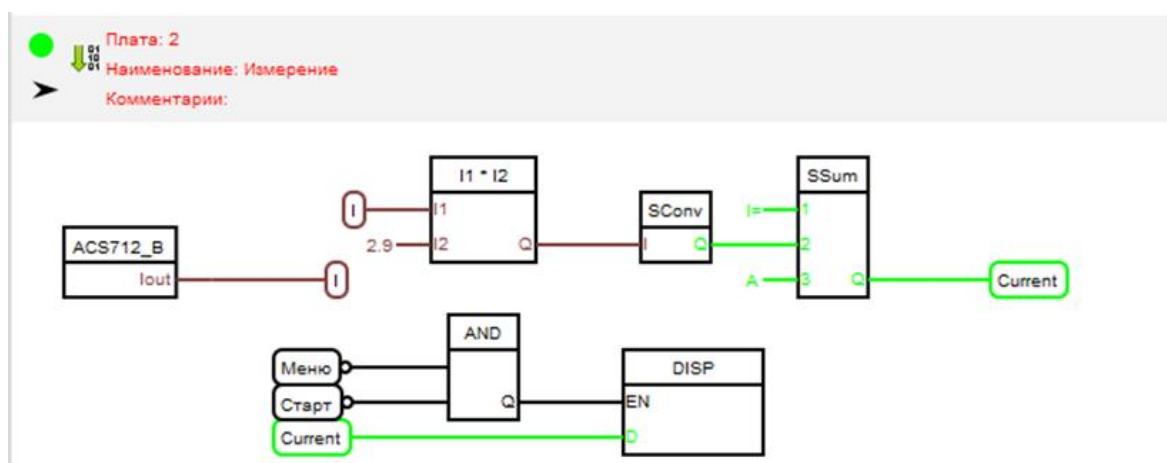


Рисунок 3 – Схема блока измерения тока

Плата «Меню»

Для настройки уставок защиты используется интерактивное меню. Пользователь может выбрать значения токов и выдержек времени для трёх ступеней МТЗ:

- **I>**, **I>>**, **I>>>** – уставки токов;
- **tI>**, **tI>>**, **tI>>>** – выдержки времени.

Значения можно изменять пошагово с помощью кнопок управления которые находятся на АПС. Это обеспечивает удобную настройку защиты без перепрограммирования микроконтроллера.

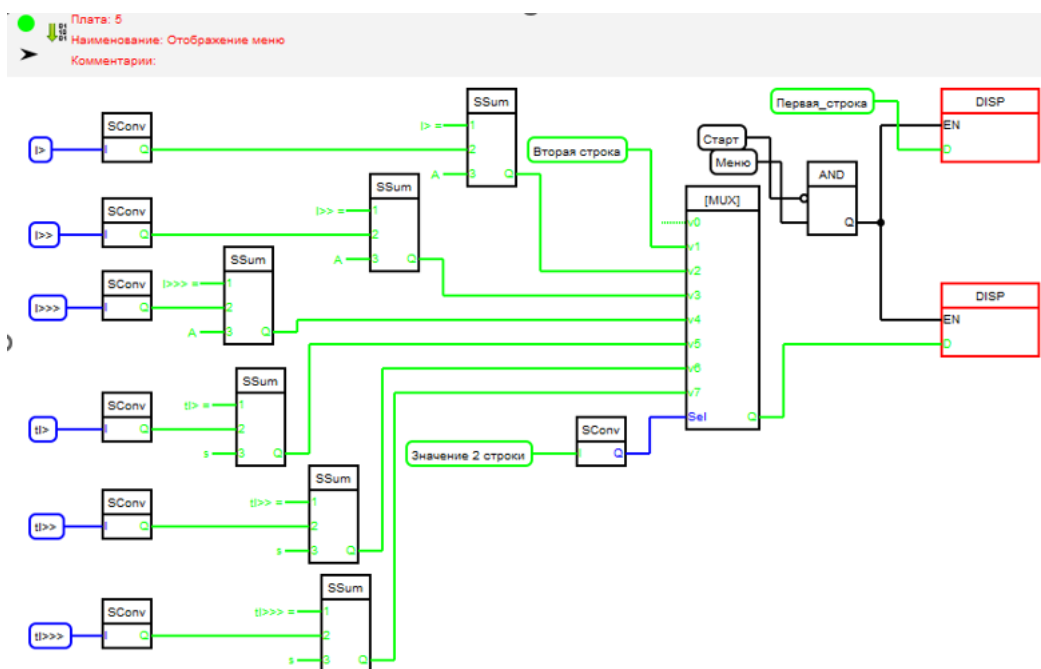


Рисунок 6 – Экран с отображением уставок и параметров

Результаты исследований

В ходе исследования и моделирования была создана рабочая модель токового реле, обеспечивающая:

- измерение тока в реальном времени;
- отображение информации на дисплее;
- настройку уставок тока и выдержек времени;
- срабатывание при аварийных режимах.

Тестирование модели токового реле показало, что устройство корректно реагирует на превышение установленных токов и формирует сигнал отключения через заданную задержку времени.

Заключение

Представленная модель демонстрирует эффективность использования среды FLProg для разработки микропроцессорных систем релейной защиты. Благодаря визуальному программированию достигается высокая гибкость, удобство настройки и наглядность работы устройства.

Разработанное токовое реле может применяться:

- в учебных целях для изучения принципов работы релейной защиты и противоаварийной автоматики.
- как прототип для промышленных решений автоматизации процессов.
- в составе лабораторных установок по электротехнике и автоматизации процессов управления и защиты.

Перспективным направлением дальнейших исследований является интеграция подобных реле в интеллектуальные энергосистемы и обеспечение их киберустойчивости [6].

Список использованной литературы

1. Santos J.L., et al. Coordinated Overcurrent Relay Development with Arduino and ACS712. – ResearchGate, 2023. URL: https://www.researchgate.net/publication/383506821_Coordinated_Overcurrent_Relay_Development_with_Arduino_and_ACS712
2. Abadi A., Widia R., et al. Analysis Simulation of Overcurrent Protection System for 3 Phase Induction Motor Using an Arduino and ACS712 Current Sensor. – ResearchGate, 2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/391169192_Analysis_Simulation_of_Overcurrent_Protection_System_for_3_Phase_Induction_Motor_Using_an_Arduino_and_ACS712_Current_Sensor
3. Susilo R.A. Design and Development of Overcurrent Protection Relay. – International Journal of Current Science Research and Review (IJCSRR), 2024. URL: <https://ijcsrr.org/wp-content/uploads/2024/10/01-0110-2024.pdf>
4. Alzyoud A.R., Alia M., et al. Modeling and Investigation of an Over Current Relay Using LabVIEW. – Journal of Electrical Systems, 2024. URL: <https://journal.esrgroups.org/jes/article/view/6597>
5. Sanati S., Azzouz M., Awad A. An Adaptive Overcurrent Protection for Solar-based DC Microgrids Using IEC 61850. – arXiv, 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2307.01940>
6. Gaggero G.B., et al. Cybersecurity Issues in Electrical Protection Relays. – Energies, MDPI, 2025. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/14/3796>

УДК 621.313

АСИНХРОНДЫ МАШИНАДАҒЫ ӨТПЕЛІ ҮРДІСТЕРДІ ЗЕРТТЕУ

Ғали А.К., Алмуратова Н.К.

Ғ.Ж.Даукеев атындағы АЭЖБУ, Алматы қаласы, Қазақстан

Аңдатпа. Бұл жұмыстың мақсаты гидроэлектрлік станцияларында қолданылатын айқындалған полюсті синхронды генераторды жобалаған кезде оның магниттік радиалды күштердің әсерінен пайда болатын діріл мен шуды есептеп оның деңгейін анықтау.

Түйін сөздер: Синхронды машина, айқындалған полюсі индуктор, полюстер саны, орама қадамы, тістік бөлік, полюстік бөлік, магниттік күштер, діріл және шу.

Синхронды машиналардағы статор өрісінің ν – ші гармоникасының амплитудасы

$$B_{\nu} = [(p/\nu)(k_{w\nu}/k_{w1})]x_{ad}B_{\delta}, \quad (1)$$

мұнда – бойлық өс бойынша якорь реакциясынан болатын статор орамасының реактивтілігі; $(p/\nu)(k_{w\nu}/k_{w1})$ мәндері 8 қосымшада көрсетілген [1].

Тістік реттегі гармоникалардың амплитудасын есептеген кезде статор орамасының тістік реттегі $B_{\nu z}$ гармоникалары тістік өткізгіш гармоникасымен B_{z1} геометриялық қосылады. Бұл кезде $B_{\nu z}$ өрістер статор тоғымен I_1 фазалас болады, ал B_{z1} өрістер қоздыру өрісімен фазалас болады. B_{z1} келесі формула бойынша анықталады

$$B_{z1} = (F_0/k_n)\Lambda_m = (F_0/k_m)\Lambda_0\xi_1 = B_\delta\xi_1.$$

Статор өрісінің жұпталған полюстерінің саны

$$\nu = (6q' + 1)p \text{ бұл кезде } q' = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$$

Бұл жерде, жалпы өндірісте қолданылатын синхронды генераторлардың полюстер саны $2p = 4$ және $2p = 6$ болатынын, ал сондай-ақ әдетте синхронды қозғалтқыштардың полюске және фазаға келетін ойықтар саны бүтін болатынын білдіреді.

Демпферлік торы болмайтын айқындалған полюсті машиналардағы роторлық өрістердің B_μ ротордағы амплитудасы ауа саңылауындағы эксцентриситеттің $\delta_{max}/\delta_{min}$ полюстік доғаның енінің полюстік бөлікке α_i қатынасына тәуелді болады:

$$B_\mu = \frac{4}{\pi} B_\delta \int_0^{\frac{\alpha_i \pi}{2}} \frac{\cos \mu \varphi}{1 + (\delta_{max}/\delta_{min} - 1)[2\varphi/(\alpha_i \pi)]^2} d\varphi. \quad (2)$$

Есептеуді ықшамдау үшін әдетте қоздырушы өрістің пішінінің тіктөртбұрышты болу шартын негізге алады ($\delta_{max}/\delta_{min} = 1$). Бұл кезде μ – ші гармоника негізгі өріс бойынша көрсетілуі мүмкін:

$$B_\mu = \frac{p \sin[\mu(\alpha_i \pi/2)]}{\mu \sin[p(\alpha_i \pi/2)]} B_\delta. \quad (3)$$

Роторы көлемді турбогенераторлар үшін қанығуды ескермеген кездегі өрістің гармоникалары келесі формула бойынша анықталады:

$$B_\mu = \frac{4}{\mu \pi} B_\delta \left\{ \frac{\sin \mu \pi [\varepsilon/(2Z'_2)] \sin \mu \pi [Z_2/(2Z'_2)]}{Z_2 \sin^2[\mu \pi (2Z'_2)]} + \frac{\sin \mu \pi [(1-\varepsilon)/(2Z'_2)]}{\sin[\mu \pi/(Z'_2)]} \cos \mu \pi \frac{Z_2}{2Z'_2} \right\}, \quad (4)$$

мұнда Z_2/Z'_2 - орамасы бар ротор ойықтары санының ойықтық бөліктің толық санына қатынасы; $\varepsilon = (b_{Z2}/t_2)$, (b_{Z2} және t_2 ротор тістерінің ені мен ойықтық бөліктің ені).

Ротор өрісінің жұпталған полюстерінің саны

$$\mu = p(2q'' + 1) \text{ бұл кезде } q'' = 0, 1, 3 \dots \quad (5)$$

q бүтін санға тең болатын машиналар үшін тербелу реті,

$$r = 2p \left[\left(q'' \pm 3q' + \frac{1}{0} \right) \right]_{- \text{ айырым}}^{- \text{ қосынды}} \quad (6)$$

Көріп отырғаныңыздай, күштік толқындардың реттік саны немесе нөлге тең немесе полюстер санына еселі болуы мүмкін.

Орамалары бөлшек сан болатын машиналар үшін r , $2p$ аз немесе оған еселі болуы мүмкін. Дірілдің жиілігі

$$f = 2f_N \left[q'' + \frac{1}{0} \right]_{- \text{ айырым}}^{- \text{ қосынды}} \quad (7)$$

Турбогенераторларда үлкен жиіліктегі діріл айқын полюсті синхронды машиналарға қарағанда айтарлықтай аз дәрежеде болуы мүмкін. Оның азайуы ауа саңылауының үлкен болуынан және көлемді роторда магнит өрісінің бәсеңдеуінен болады.

Магниттік шуды есептеу ыңғайлы болу үшін асинхронды машиналарды есептегендегідей күштік толқындардың реттік санының кестесін құрған дұрыс.

Келесі деректер бойынша айқындалған полюсті үш фазалы синхронды генератордың жоғары жиіліктегі діріліне есептеу жүргіземіз: қуаты – 650 кВА; кернеуі – 400 В; жиілігі – 50 Гц; полюстер саны - $2p = 4$; статор ойықтарының саны - $Z_1 = 108$; Картердің коэффициенті - $k_c = 1,4$; Статор тоғының және қоздырушы ағынның фазалық ығысулары - $\varphi_1 = \pi/5$; $\varphi_0 = \pi/2$; ауа саңылауының индукциясы - $B_\delta = 0,95$ Тл; статор орамасының қысқартылған қадамы - $\beta = 11/15$; статордың сыртқы радиусы - $R_c = 70$ см; статордың ішкі радиусы - $R_i = 56$ см; статор арқасының биіктігі $h_a = 14$ см; статор арқасының орташа цилиндрлік жазықтығына келетін статордың массасы - $m_c = 0,46$ кг; реактивті кедергісі - $x_{ad} = 1,4$.

Роторда демпферлік тор жоқ. Статор ойықтары түзу.

Ш е ш у і. 1 кестені құрамыз. Есептеуге келтірілген кестеде толқындардың текқана ең кіші реттері келтірілгенб яғни 0 және 4. Магниттік дірілді жиіліктің барлық дыбыс диапазонында есептеу әдетте электронды есептеу машиналарымен орындалады.

Төменде тістік реттегі гармоникалармен қоздырылатын ең қарқынды дірілдерге есептеу жүргізіледі.

Есептек кестеде бірінші реттегі тістік гармоникалардың мәндері жақшаға алынған. $\nu = -106, \mu = +110, r = -4$ толқындармен қоздырылатын дірілдер үшін.

1. Қоздырушы күштердің жиілігі

$$f = 2f_N \left(q'' + \frac{1}{0} \right) = 2 \cdot 50 \cdot (24 + 1) = 2500 \text{ Гц},$$

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 2500 = 15700 \text{ рад/с}.$$

2. Статор гармоникасының амплитудасы:
ораманы таратудан

$$B_\nu = [(p/\nu)(k_{w\nu}/k_{w1})]x_{ad}B_\delta = 0,0316 \cdot 1,4 \cdot 0,95 = 0,042 \text{ Тл};$$

статордың тістілігінен ($k = 1$)

$$B_{Z1} = B_{\delta} \xi_1 = 0,95 \cdot 0,32 = 0,29 \text{ Тл},$$

мұнда 4.2 суреттен [1] $k_c = 1,4$ үшін $\xi = 0,632$; қортынды мәні

$$B_v = \left| 0,042^{j\frac{\pi}{5}} + 0,29^{j\frac{\pi}{2}} \right| = 0,32 \text{ Тл}.$$

3. Ротор гармоникасының амплитудасы

$$B_{\mu} = \frac{p \sin[\mu(\alpha_i \pi / 2)]}{\mu \sin[p(\alpha_i \pi / 2)]} B_{\delta} = \frac{2}{98} \cdot \frac{\sin[98 \cdot (0,7 \cdot \frac{\pi}{2})]}{\sin[2 \cdot (0,7 \cdot \frac{\pi}{2})]} \cdot 0,66 = 0,0135 \text{ Тл}.$$

4. Меншікті радиалды күш

$$p = 40 B_v B_{\mu} = 40 \cdot 0,32 \cdot 0,0135 = 0,173 \text{ Н/см}^2.$$

5. Статордың толық механикалық кедергісі

$$Z_c = \omega m_c - \frac{1}{(\omega \lambda_c)} = 15700 \cdot 4,6 \cdot 10^{-3} - \frac{1}{15700 \cdot 0,0000236} = 6,9 \text{ Н} \cdot \text{с/см},$$

мұнда

$$\lambda_c = \frac{12 R_c}{E} \left(\frac{R_c}{h} \right)^3 \frac{r^2 + 1}{r^2 (r^2 - 1)^2} = \frac{12 \cdot 70^4}{2,1 \cdot 10^7 \cdot 14^3} \cdot \frac{4^2 + 1}{4^2 (4^2 - 1)^2} = 0,0000236 \frac{\text{см}}{\text{Н}}.$$

6. Дірілдің деңгейі

$$y = \frac{p}{Z_c} = \frac{0,173}{\sqrt{2} \cdot 6,9} = 0,0178 \text{ см/с}.$$

$$L = 20 \lg \frac{\omega \cdot y}{3 \cdot 10^{-2}} = 20 \lg \frac{15700 \cdot 0,0178}{3 \cdot 10^{-2}} = 79 \text{ дБ}.$$

Осыған ұқсас есептеулерді барлық гармоникалар үшін жүргізеді.

Әдебиеттер

1. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 2016. – 208 с.
2. Лазориу Д.Ф., Бикир Н. Шум электрических машин и трансформаторов. Пер. с рум. – М.: «Энергия» 2021 - 271 с.
3. Кучер В.Я. Вибрация и шум электрических машин: Письменные лекции. – СПб.: СЗТУ, 2014. – 54 с.
4. Колесников, К.С. Вибрации в технике / ред. Ф.М. Диментберг, К.С. Колесников. - М.: Машиностроение, 2018.

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ КАЗАХСТАНА

Кабденов М.М. *, Нигматуллин Р. М., Агимов Т.Н.

Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы,
Казахстан

*e-mail: m.kabdenov@aues.kz

Введение

Технология блокчейн – это распределённый реестр, позволяющий надёжно хранить и передавать данные без посредников. Изначально прославившись в сфере криптовалют, сегодня блокчейн рассматривается как инструмент цифровой трансформации в различных отраслях, включая электроэнергетику[1].

Технология блокчейн как распределённый реестр открывает широкие перспективы для цифровой трансформации энергетики Казахстана. В условиях модернизации энергосектора и перехода к «умным сетям» она может обеспечить повышение прозрачности, надёжности и эффективности работы электрических сетей. Однако применение блокчейн в отечественной электроэнергетике связано как с новыми возможностями, так и с рядом вызовов, требующих научного анализа и практической проработки.

Цель исследования заключается в комплексном изучении возможностей и проблем внедрения блокчейн-технологий в электрических сетях Казахстана, определении перспектив их интеграции и формировании рекомендаций по использованию в условиях цифровизации и перехода к интеллектуальным энергосетям.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- провести теоретический анализ сущности блокчейн, его свойств и мировых тенденций применения в энергетике;
- исследовать текущее состояние внедрения технологии в Казахстане, включая пилотные проекты, инициативы и правовые основы;
- оценить преимущества и ожидаемые выгоды от применения блокчейн в электроэнергетике страны;
- выявить барьеры и вызовы на пути внедрения, включая технические, организационные и нормативные аспекты;
- определить перспективные направления дальнейшего развития и возможные пути адаптации международного опыта к казахстанским условиям.

Научная новизна исследования состоит в комплексном анализе применения блокчейн именно в контексте электроэнергетики Казахстана. В работе систематизированы перспективы и проблемы внедрения технологии с учётом национальной специфики энергорынка, выявлены уникальные вызовы,

связанные с цифровой инфраструктурой и правовой базой, предложены пути интеграции блокчейн в систему Smart Grid и одноранговую торговлю энергией. Кроме того, проведена адаптация международного опыта к отечественным условиям, что формирует основу для дальнейших исследований и пилотных внедрений.



Рис. 1. – Динамика роста интереса и капитализации технологии блокчейн

Для Казахстана, планирующего модернизацию энергосектора и переход к «умным» сетям, блокчейн может стать важной частью этих процессов. Рассмотрим основные направления применения блокчейн в электрических сетях, текущее состояние дел в Казахстане, законодательные аспекты, ожидаемые выгоды и барьеры, а также сравним ситуацию с мировым опытом.

Блокчейн в энергетических сетях: безопасность, учёт и надёжность

Одно из ключевых свойств блокчейн – неизменяемость и защищённость данных. Все транзакции в сети записываются в распределённый реестр, копии которого хранятся у множества участников. Благодаря криптографическим методам, изменить или подделать ранее внесённые записи практически невозможно[2]. В энергетических сетях это означает, что данные об выработке и потреблении электроэнергии, а также операциях между участниками, будут надёжно защищены от несанкционированного доступа и искажения. Например, блокчейн позволяет децентрализованно хранить все данные о потоках энергии и сделках, формируя защищённый реестр, доступный для проверки всеми участниками, но невосприимчивый к несанкционированным изменениям[3]. Такая архитектура повышает доверие между субъектами энергорынка и снижает риск мошенничества с данными.

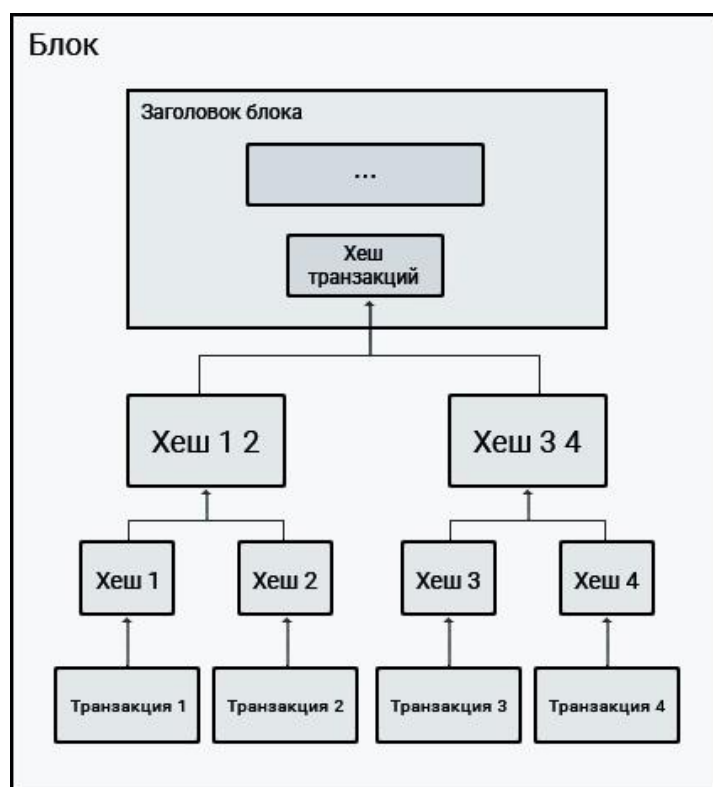


Рис. 2. – Стандартная схема блока транзакций

Блокчейн-технология оказывается фундаментальной для автоматического мониторинга, отслеживания и записи информации об электроэнергии как активе[4]. В сочетании с умными счётчиками, блокчейн позволяет создать единый неизменяемый архив данных о генерации и потреблении электричества[5]. Каждая киловатт-час, отпущенная в сеть, может быть точно приписана конкретному производителю и потребителю, а все операции фиксируются в хронике блоков. Это повышает прозрачность учёта: каждый участник видит полную историю движения энергии и финансовых расчётов, что исключает несанкционированное вмешательство. Так, в проекте казахстанских исследователей предлагается интегрировать блокчейн в систему Smart Grid, чтобы автоматизировать распределение энергоресурсов и вести полную историю транзакций с возможностью проверки всеми участниками сети[6]. На практике это облегчит отслеживание источников электроэнергии (например, доли возобновляемой энергии) и расчёты между генераторами и потребителями. В Европе уже применяются подобные подходы: энергокомпании позволяют клиентам напрямую покупать «зелёную» энергию у производителей, а блокчейн обеспечивает прозрачность происхождения каждого мегаватт-часа[7].

Переход от централизованной модели энергосети к более децентрализованной требует новых подходов к обеспечению надёжности. Блокчейн рассматривается как инструмент для повышения устойчивости энергосистемы за счёт децентрализации управления и внедрения интеллектуальных смарт-контрактов. По мнению исследователей, интеграция

блокчейн в «умные сети» повышает эффективность, надежность и безопасность электроэнергетической системы благодаря автоматизации множества процессов[6]. Смарт-контракты на базе блокчейн могут автоматически балансировать спрос и предложение: например, при избытке генерации они сразу направят лишнюю энергию в накопители, а при дефиците – выдадут её обратно в сеть[3]. Такие автоматизированные меры помогают избежать перегрузок и перепадов напряжения. Кроме того, одноранговая торговля энергией (P2P) на блокчейне позволяет потребителям напрямую покупать или продавать электроэнергию друг другу, гибко реагируя на локальные перебои или пики нагрузки[6]. Децентрализация торговли повышает устойчивость рынка – система способна работать даже при локальных сбоях, поскольку нет единой точки отказа, и множество узлов поддерживают функционирование реестра. В целом, грамотное применение блокчейн в сочетании с технологиями умной энергетики может сделать энергосеть Казахстана более живучей перед внешними факторами (например, резкими изменениями генерации из-за погоды) и более надёжной для потребителей.

Текущее состояние и инициативы внедрения технологии-Блокчейн в энергетике Казахстана

В Казахстане практическое применение блокчейн в электроэнергетике находится на стадии пилотных проектов и частных инициатив, при этом наибольшее развитие получила сфера цифрового майнинга. После того как страна стала одним из мировых центров добычи криптовалют (до 18% глобального хешрейта биткоина в 2021 году)[8], остро встал вопрос влияния майнинг-ферм на энергосистему.

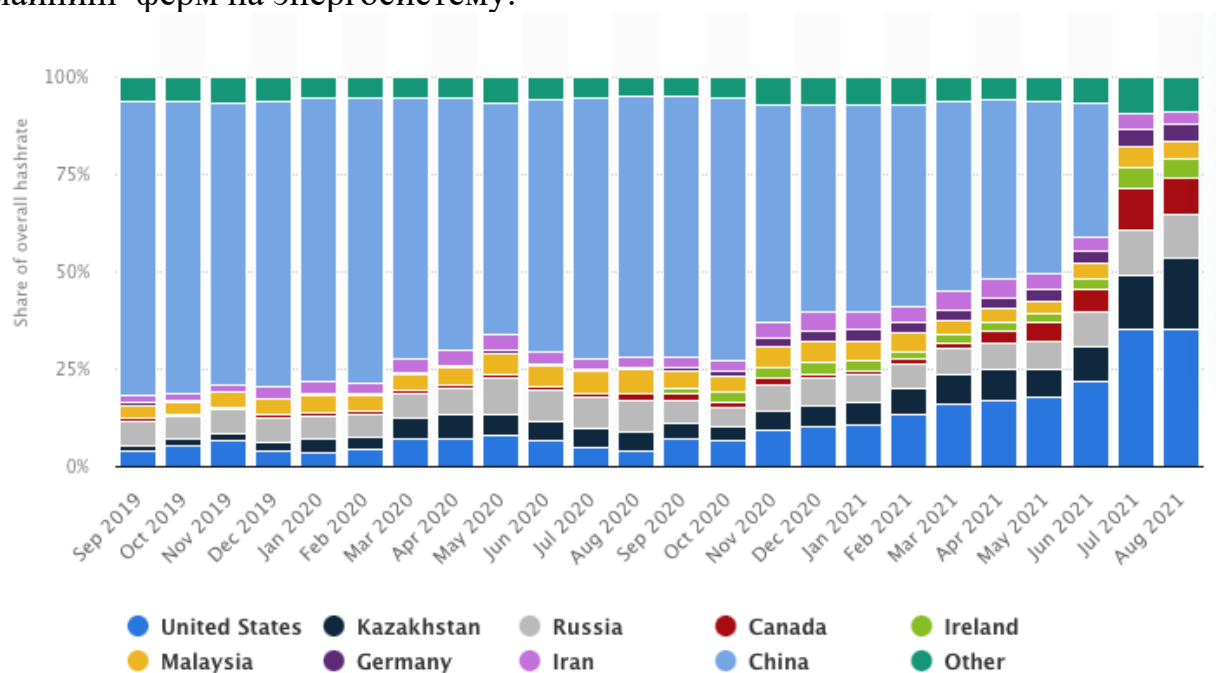


Рис. 3. – Диаграмма глобального хешрейта биткоина на период 2019-2021 г.

Государство отреагировало серией мер: «белые» (легальные) майнеры интегрируются в официальную энергосеть на определённых условиях, а «серые» майнеры устраняются. В 2021–2022 гг. Министерство энергетики РК наладило диалог с блокчейн-индустрией, подчеркнув, что добросовестные майнинг-фермы не будут отключаться от сети, если работают в рамках закона[8]. Майнеров выделили в отдельную категорию потребителей, предоставляя им энергию по остаточному принципу – только из излишков после покрытия нужд населения и промышленности[9]. Ассоциации блокчейн-технологий, со своей стороны, заявили о готовности инвестировать в новые энергетические мощности (включая ВИЭ) и даже закупать импортную электроэнергию, чтобы снизить нагрузку на отечественную энергосистему[8]. По итогам совещаний была принята совместная «дорожная карта»: ускорить запуск рынка балансирующей энергии (demand response) и привлечь инвестиции майнеров в строительство генерации возобновляемой энергии с гарантиями отбора мощности[8]. Эти инициативы направлены на то, чтобы майнинг не подрывал энергобезопасность, а напротив – стимулировал развитие энергосети.

Помимо сферы майнинга, в Казахстане предпринимаются и другие шаги по внедрению блокчейн. Образовательные и научные проекты получают поддержку: например, в 2022 году при Национальном банке и технопарке Astana Hub создан блокчейн-центр, а запущенная программа готовит 40 тысяч IT-специалистов с компетенциями в технологии блокчейн[1]. В вузах ведутся исследования по применению блокчейн в электроэнергетике – так, в Международном университете информационных технологий (МУИТ) реализуется научный проект по интеграции блокчейн в систему Smart Grid для децентрализованного управления распределённой энергосетью[6].

Частный сектор также проявляет активность. Появляются стартапы, предлагающие решения на стыке финтех и энергетики. Пример – компания *BlockEnergy KZ*, позиционирующая себя пионером применения блокчейн в энергетическом секторе Казахстана[10]. Она предлагает энергетическим предприятиям услуги по внедрению распределённых реестров для прозрачного учёта энерготранзакций и смарт-контрактов для автоматизации расчётов[11]. В числе продемонстрированных кейсов – пилотный проект цифровизации энергосетей Алматы, где, как заявляется, с помощью блокчейн удалось снизить потери электроэнергии и почти полностью искоренить неточности учёта[12]. Также разрабатываются платформы торговли возобновляемой энергией между производителями и потребителями, призванные облегчить интеграцию «зелёной» энергетики[12]. Хотя многие из этих проектов пока существуют в формате тестовых внедрений, они показывают интерес рынка к новым технологиям.

В целом текущая ситуация такова: в Казахстане уже создаются предпосылки для использования блокчейн в электроэнергетике (нормативные, инфраструктурные и кадровые), но массовых реализаций пока мало. Основной практический драйвер – индустрия криптомайнинга, которая заставила

модернизировать подходы к управлению энергосетью. Параллельно закладывается фундамент (через исследования и пилоты) для будущих децентрализованных энергетических сервисов на базе блокчейн.

Правовые и нормативные аспекты цифровизации энергосектора Казахстана

Вопросы регулирования играют ключевую роль во внедрении блокчейн-технологий в энергетику. В Казахстане последние годы принят ряд нормативных актов, обеспечивающих правовую базу для цифровых инициатив, прежде всего связанных с майнингом криптовалют. В начале 2023 года был одобрен Закон РК «О цифровых активах», которым узаконивается деятельность майнеров и определяются требования к их подключению к электросетям. В частности, внесены изменения в Закон «Об электроэнергетике»: теперь цифровые майнеры обязаны закупать электроэнергию установленными способами – на централизованных биржевых торгах через единого покупателя, у отдельных электростанций, не подключённых к Единой энергосистеме РК, либо по импорту из-за рубежа[9]. При этом минимальный объём потребления установлен в размере 1 МВт средней мощности в сутки[9], что исключает работу мелких «домашних» ферм вне правового поля. Правила оптового рынка также ограничивают майнеров: они могут закупать электричество по остаточному принципу и конкурируют между собой на аукционах, повышая цену за дефицитные ночные киловатты[9]. Если внутренней генерации не хватает, майнерам разрешается импортировать энергию из соседних стран, но только после исчерпания квот единого покупателя и при наличии свободной пропускной способности сетей[9]. Эти меры направлены на обеспечение энергобезопасности: майнинг-фирмы фактически превращаются в балансирующий ресурс, потребляя излишки и автоматически сокращая работу при дефиците (по закону, в периоды пикового спроса майнеры обязаны приостанавливать деятельность во избежание отключений у других потребителей)[9].

Для усиления ответственности майнеров за устойчивость сети правительство также внесло поправки, предусматривающие штрафы за отклонение от заявленных графиков потребления и стимулы к потреблению в ночные часы, когда избыток мощности позволяет стабильнее загружать электростанции[9]. Одновременно готовятся изменения, облегчающие майнерам доступ к возобновляемой энергии: например, разрешено покупать энергию у ВИЭ-генераторов вне долгосрочных договоров с финансовым централизованным покупателем[9]. Всё это свидетельствует о формировании комплексной регуляторной экосистемы, интегрирующей блокчейн-индустрию в энергетику.

Что касается более широкого цифрового развития энергосектора, в Казахстане реализуется государственная программа «Цифровой Казахстан», в рамках которой энергетике уделяется особое внимание. Разработана «дорожная

карта» цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса до 2025 года[13]. Основной упор делается на внедрение автоматизированных систем учёта (АСКУЭ), интеллектуальных приборов, платформ сбора данных и предиктивной аналитики для генерации и сетевого хозяйства[13]. Хотя непосредственно технология блокчейн в этих документах не упоминается, создаваемая цифровая инфраструктура (умные счётчики, датчики, онлайн-платформы мониторинга) является необходимым условием для дальнейшего использования блокчейн. Без смарт-измерителей и оцифровки процессов невозможно наполнить распределённый реестр достоверными данными. Таким образом, нормативная база цифровизации (стандарты «умной» энергетики, требования к учёту, кибербезопасность систем) косвенно готовит почву и для блокчейн-решений.

Важно отметить, что законодательство в сфере блокчейн продолжает развиваться. Поскольку технология новая, регулирующие органы столкнулись с необходимостью менять устаревшие нормы. Аналогичный процесс идет и в других странах: например, в России к 2018 году признали, что законодательные барьеры сдерживают внедрение блокчейн в энергетике, и утвердили план их постепенной отмены, включая пересмотр технических стандартов, не отвечающих современному уровню технологий[14]. В Казахстане уже сделаны первые шаги – принят закон о цифровых активах, введены правила для майнеров, но предстоит дальнейшая адаптация нормативной базы под новые модели энергообмена (например, одноранговые сделки между домохозяйствами). Регуляторам важно обеспечить баланс между инновациями и устойчивой работой энергосистемы: предоставить песочницы и пилотные проекты для отработки блокчейн-сервисов, параллельно защищая интересы конечных потребителей и энергетическую безопасность.

Перспективы, потенциальные выгоды и барьеры внедрения блокчейн

Применение блокчейн в электрических сетях сулит Казахстану ряд значимых выгод. Среди ключевых перспектив можно выделить:

- Прозрачность и доверие. Благодаря неизменяемому реестру, все участники энергорынка (генерирующие компании, сетевые операторы, потребители) получают прозрачный доступ к данным об операциях[3]. Это повышает доверие между сторонами, упрощает расчёты и аудит. Например, блокчейн способен обеспечить прослеживаемость происхождения электроэнергии – вплоть до конкретной солнечной или ветровой станции. Это открывает возможности для сертификации «зелёной» энергии и торговли углеродными кредитами на новом уровне достоверности данных[3].

- Новые рынки и услуги. Технология блокчейн позволяет реализовать концепции децентрализованной энергетики, в том числе одноранговую торговлю энергией (peer-to-peer). Потребители могут выступать и производителями (например, владельцы домашних солнечных панелей) и продавать излишки соседям напрямую через смарт-контракты[6]. Это стимулирует развитие

потребительских энерго-сообществ, микросетей и виртуальных электростанций. Пилоты в других странах показали жизнеспособность таких моделей: к примеру, в Австралии платформа *Power Ledger* успешно проводила P2P-торги между домовладельцами, а в США проект *Brooklyn Microgrid* позволил жителям района покупать энергию у соседских солнечных установок. Для Казахстана с его обширной территорией эта модель актуальна для удалённых или слабо связанных регионов, где локальные блокчейн-микросети могут повышать энергообеспеченность. Новые услуги также включают динамическое ценообразование (смарт-контракты могут начислять плату в зависимости от времени использования энергии) и управление спросом – вознаграждение потребителей за уменьшение нагрузки в пиковые часы.

- **Повышение эффективности и снижение издержек.** Автоматизация расчётов и устранение посредников (например, снижение количества уровней между производителем и конечным покупателем) ведут к экономии. Смарт-контракты способны исполнять платежи и договоры поставки энергии мгновенно при наступлении условий, исключая длительные ручные процедуры[3]. Это сокращает операционные расходы энергокомпаний и устраняет ошибки. Опыт проектов показывает, что внедрение блокчейн-решений может снизить коммерческие потери и неучтённое потребление. Так, заявленный пилот в Алматы добился снижения потерь электроэнергии на четверть и повышения точности учёта до 99,8%[12]. Кроме того, *децентрализованные платформы управления сетью* на базе блокчейн помогают оптимально распределять потоки энергии, предотвращая перегрузки и простои генерации, что повышает общую эффективность энергосистемы[7].

- **Устойчивость и интеграция ВИЭ.** Блокчейн облегчает привлечение инвестиций в возобновляемые источники энергии. С его помощью можно организовать коллективные проекты ВИЭ (например, несколько домохозяйств совместно финансируют солнечную установку и автоматически распределяют выработанную энергию и прибыль через смарт-контракты[3]). Это делает «зеленую» энергию более доступной и выгодной. Также за счёт децентрализации повышается устойчивость сети: локальные блокчейн-сети могут функционировать автономно при авариях на магистральной сети, а разнообразие генерации (солнечные, ветровые установки) снижают нагрузку на центральную инфраструктуру. Таким образом, блокчейн поддерживает переход к низкоуглеродной энергетике, облегчая учет и интеграцию распределенной генерации и стимулируя потребителей участвовать в развитии зеленой энергетики[6].

Несмотря на перечисленные перспективы, существуют серьезные барьеры и вызовы на пути внедрения блокчейн в энергетику. Основные из них:

- **Инфраструктура и стандартизация.** Для работы блокчейн нужна широкая цифровизация энергетики: внедрение умных счётчиков, датчиков, систем связи на всех уровнях. В Казахстане пока не весь сетевой комплекс оснащён такими устройствами. Требуются крупные инвестиции в инфраструктуру «умной сети», без которой блокчейн-платформа будет нечем наполнить. Также отсутствуют

единые стандарты передачи данных и взаимодействия устройств разных производителей – это мешает созданию совместимых децентрализованных систем[15]. Решением может стать государственная программа стандартизации (например, единый протокол для умных счётчиков) и пилотные зоны, где новые технологии будут отрабатываться комплексно.

•Организационные и рыночные барьеры. Традиционные энергетические компании могут воспринимать децентрализованные модели как угрозу своему бизнесу. Исторически электроэнергетика – отрасль с мощными монополистами и регуляторными рамками. Отсутствие мотивации у крупных игроков тормозит инновации: компании уже вложили огромные средства в существующую инфраструктуру и не спешат инвестировать в новые схемы, которые потенциально снижают их контроль и прибыль[15]. Есть риск возникновения «невостребованных активов» (stranded assets), если внезапно уйти от центральной модели. Поэтому внедрение блокчейн требует изменения мышления и бизнес-моделей: энергетическим компаниям важно самим стать участниками процесса, например, предоставляя платформы для P2P-торговли и выступая гарантом надежности. В противном случае они могут затягивать изменения. Кроме того, низкая осведомленность специалистов и населения о возможностях блокчейн создает дополнительный барьер[16]. Необходимо обучение кадров в энергетике цифровым навыкам и разъяснительная работа с потребителями, чтобы новые сервисы получили доверие и распространение.

•Регуляторная неопределённость. Законодательство зачастую не успевает за технологическими инновациями. Сейчас прямые P2P-продажи энергии между гражданами или мелкими производителями не вписываются в существующие правила рынка (тарифные политики, лицензирование деятельности по энергосбыту и т.п.). Отсутствие нормативной базы для таких транзакций – серьёзное препятствие. Урегулировать нужно вопросы ответственности за надежность поставок, метрологии (чьи данные считать легитимными при расчетах) и защиты прав потребителей в децентрализованной сети. Регуляторы Казахстана пока лишь приближаются к этим задачам. Позитивным сигналом являются инициативы по устранению устаревших норм и разработке условий для экспериментов в энергетике[14]. В перспективе требуются пилотные правовые режимы (регуляторные «песочницы»), где блокчейн-проекты смогут работать с частичным освобождением от строгих правил для демонстрации преимуществ. Затем удачные решения можно масштабировать, закрепив на уровне законов. Без поддержки государства внедрение блокчейн может затянуться или пойти стихийным путём.

Таким образом, внедрение блокчейн обещает Казахстану качественные улучшения в управлении энергосистемой – от прозрачности и экономии до гибкости и инновационного роста. Однако на пути стоят не только технические проблемы, но и консервативность отрасли, пробелы в регуляциях и объективные сложности интеграции новых ИТ-решений. Преодоление этих барьеров потребует совместных усилий государства, бизнеса и научного сообщества.

Международный опыт использования блокчейн в энергетике

Мировая энергетика уже накопила определённый опыт применения блокчейн-технологий, и Казахстан может учесть эти уроки. В развитых странах ведётся множество экспериментов и пилотных проектов. В Европе крупные энергокомпании, такие как итальянская Enel и немецкая RWE, тестировали блокчейн-платформы для прямой торговли возобновляемой энергией между потребителями и производителями. Как упоминалось, европейские провайдеры запускают программы, где клиенты через блокчейн могут выбирать и покупать электроэнергию непосредственно с определённых солнечных или ветровых ферм[7]. Это повышает прозрачность и способствует более быстрому росту зелёной энергетики.

Австралия стала одним из пионеров в этой сфере: стартап Power Ledger реализовал несколько пилотов по одноранговому обмену энергией на уровне микрорайонов. Домохозяйства с солнечными батареями продавали излишки энергии соседям через мобильное приложение, работа которого обеспечивалась блокчейн-смарт-контрактами. Эти проекты получили поддержку местных властей и продемонстрировали экономическую выгоду P2P-торговли для населения.

В США известен проект Brooklyn Microgrid (Нью-Йорк), где блокчейн-платформа позволила десяткам жителей осуществлять сделки купли-продажи электричества, минуя традиционную энергокомпанию. Кроме того, консорциумы компаний (включая такие корпорации, как IBM, Oracle, Siemens) разрабатывали решения для оптимизации сетевых операций с помощью распределённых реестров – например, для учёта возобновляемых сертификатов или управления зарядкой электромобилей в масштабах города. Яркий пример – Energy Web Foundation, международная некоммерческая организация, создавшая открытый блокчейн специально для энергетического сектора: на её базе реализуются проекты отслеживания происхождения энергии (green proof) в разных странах.

В целом международный опыт показывает, что блокчейн востребован в нескольких ключевых направлениях: - Peer-to-Peer энергетические рынки. В ряде стран (США, Австралия, Германия, Нидерланды) созданы локальные P2P-платформы, где потребители напрямую торгуют энергией. Это особенно эффективно в сообществах с распределённой генерацией. Технологически все такие платформы пока находятся в пилотной стадии, но они подтвердили работоспособность концепции и интерес потребителей к ней. - Управление распределённой генерацией. Блокчейн упрощает координацию множества мелких источников энергии. В проектах виртуальных электростанций (Virtual Power Plants) в Европе блокчейн применялся для агрегирования сотен солнечных и батарейных систем в единую сеть, которая предлагает мощность на рынок подобно большой электростанции[7]. Смарт-контракты автоматически собирали данные от установок и формировали заявки на продажу/покупку на основе общих возможностей. - Учёт экологических атрибутов. Международная

торговля зелёными сертификатами и квотами эмиссий – ещё одна область применения. Например, в Сингапуре и Чили реализованы блокчейн-системы для отслеживания “чистоты” киловатт-часов и подтверждения сокращения выбросов. Это упрощает для компаний покупку гарантированных возобновляемых объёмов энергии в любой точке мира, зная, что записи в реестре достоверны. - Повышение эффективности сетей. В Японии, где остро стоит вопрос стабильности энергоснабжения, энергетическая компания ТЕРСО инвестировала в блокчейн-стартапы для разработки систем автоматического балансирования нагрузки. В результате несколько районов Токио получили распределённые решения, предотвращающие перегрузки в пик за счёт прозрачного обмена информацией между потребителями о текущем потреблении. - Обслуживание и биллинг. Несколько проектов сосредоточены на оптимизации расчётов за электричество. Например, на Филиппинах национальная электросеть тестировала блокчейн для мгновенного клиринга платежей между генерирующими компаниями и сетевыми операторами, что позволило снизить финансовые издержки и ускорить взаиморасчёты.

В глобальном масштабе сформировалось и сообщество разработчиков блокчейн-решений для энергетики. Помимо упомянутой Energy Web, активно действуют компании LO3 Energy (США), WePower (платформа из Литвы для инвестиций в ВИЭ через токены), Conjoule (стартап из Германии, пилотировавший городские P2P-сети) и другие. Крупные ИТ-корпорации тоже внедряются в эту сферу: IBM, SAP, Microsoft предлагают корпоративные блокчейн-платформы, адаптированные под нужды энергетики[7]. Это говорит о высокой уверенности бизнеса в перспективах технологии.

Для Казахстана международный опыт полезен тем, что показывает реальные кейсы и возможные подводные камни. Многие зарубежные проекты финансировались государством или при участии регуляторов – следовательно, и в наших условиях поддержка правительства (гранты, пилотные правовые режимы) может стать решающим фактором. Успешные кейсы подтверждают: блокчейн способен существенно повлиять на энергетический сектор, повысив его эффективность, устойчивость и ориентированность на потребителя[7]. В то же время опыт показывает необходимость решения вопросов масштабируемости и стандартизации – над чем сейчас работают глобальные консорциумы. Включение Казахстана в международные инициативы (например, участие в Energy Web или аналогичных организациях) позволило бы ускорить трансфер знаний и технологий.

Несомненно, мировая тенденция такова, что блокчейн-услуги в энергетике расширяются по всему миру, и эта технология рассматривается как один из столпов «энергетики будущего»[7]. Казахстан, обладая развитым ИТ-сектором и потребностью модернизировать энергетическую инфраструктуру, имеет возможность воспользоваться лучшими практиками. Международный опыт служит ориентиром, какие проекты оправдывают себя экономически и технически, а какие – пока нет, позволяя нашей стране более эффективно выстраивать собственную стратегию внедрения блокчейн в электроэнергетику.

Список литературы

1. Блокчейн: как развивается это направление в мире и перспективы для Казахстана [Электронный ресурс]. – URL: https://www.inform.kz/ru/blokcheyn-kak-razvivaetsya-eto-napravlenie-v-mire-i-perspektivy-dlya-kazahstana_a4052876
2. Блокчейн: как технология применяется в энергетике, хэш-функции в блокчейне [Электронный ресурс]. – URL: <https://e-plus.media/technologies/kak-energetiki-podruzhlili-blokcheyn-s-aviacziej-i-v-chem-sekrety-etoj-tehnologii/>
3. Технология Блокчейн в энергетике – AIZ [Электронный ресурс]. – URL: <https://aiz.com/documentation/articles/blockchain-energy/>
4. Oganezov_Perspektivy [Электронный ресурс]. – URL: https://libeloc.bsuir.by/bitstream/123456789/43898/4/Oganezov_Perspektivy.pdf
5. Блокчейн в энергетике: как по-новому продавать электричество [Электронный ресурс]. – URL: <https://decenter.org/blokcheyn-v-energetike-kak-po-novomu-prodavay-elektrichestvo/>
6. AP22686211. Международный университет информационных технологий [Электронный ресурс]. – URL: <https://iitu.edu.kz/ru/articles/article2/finansiruemie-nauchnie-proekti/ap22686211/>
7. Блокчейн в энергетическом рынке: возможности и вызовы впереди. Exactitude Consultancy [Электронный ресурс]. – URL: <https://neuron.expert/news/blockchain-in-energy-market-opportunities-and-challenges-ahead-exactitude-consultancy/10554/ru/>
8. «Я сторонник диалога». Глава Минэнерго встретился с «белыми» майнерами [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/energo/press/news/details/282264?lang=ru>
9. Энергобезопасность и налоги: как работают майнеры в Казахстане [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.inform.kz/ru/energobezopasnost-i-nalogi-kak-rabotayut-mayneri-v-kazahstane-a2f5f3>
10. Финансовые технологии и блокчейн в энергетике Казахстана. BlockEnergy KZ [Электронный ресурс]. – URL: <https://blockenergykz.com/blog.php>
11. Услуги – BlockEnergy KZ: финансовые технологии и блокчейн в энергетике Казахстана [Электронный ресурс]. – URL: <https://blockenergykz.com/services.php>
12. Кейсы – BlockEnergy KZ: финансовые технологии и блокчейн в энергетике Казахстана [Электронный ресурс]. – URL: <https://blockenergykz.com/cases.php>
13. Цифровизация топливно-энергетического комплекса страны. Profit.kz [Электронный ресурс]. – URL: <https://profit.kz/news/68020/Cifrovizaciya-toplivno-energeticheskogo-kompleksa-strani/>
14. Применение блокчейн в энергетике перестанут ограничивать законодательно – Индикатор [Электронный ресурс]. – URL: <https://indicator.ru/engineering-science/dorozhnaya-karta-energynet-08-05-2018.htm>

15. Transactive Energy Implementation Challenges – IEEE Blockchain Technical Community [Электронный ресурс]. – URL: <https://blockchain.ieee.org/verticals/transactive-energy/topics/transactive-energy-implementation-challenges>

16. Особенности внедрения технологии блокчейн в энергетике [Электронный ресурс]. – URL: <https://vaael.ru/ru/article/view?id=637>

УДК 621.314.57:

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ В СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Комекбай Д.Н., Зенченко А.Ю., Нигматуллин Р.М., Агимов Т.Н.
Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева,
Алматы, Казахстан
e-mail: Di.komekbai@au.es.kz,

Введение

Автоматическое регулирование напряжения (АРВ) синхронного генератора основано на управлении током возбуждения, подаваемым в обмотку ротора [1]. При изменении нагрузки генератора изменяются его выходное напряжение и угол нагрузки, что приводит к отклонению напряжения от заданного значения. Система АРВ непрерывно сравнивает фактическое напряжение на выводах генератора с опорным (заданным) и формирует управляющее воздействие на возбудитель. Если напряжение снизилось система повышает ток возбуждения, увеличивая магнитный поток ротора и восстанавливая номинальное напряжение. Если же напряжение выше нормы, ток возбуждения уменьшается. регулирования по принципу отрицательной обратной связи.

Целью исследования: обоснование и разработка критериев эффективности применения микроконтроллеров в системах автоматического регулирования выходного напряжения синхронных генераторов, с учётом современных требований к надёжности, быстродействию и адаптивности работы генераторов в условиях изменяющихся нагрузок и помех.

Задачи исследования:

- Проанализировать возможности применения микроконтроллера Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 для автоматизации экспериментального стенда синхронного генератора.
- Разработать принципиальную схему автоматизации с использованием микроконтроллера, релейного модуля и силовых элементов.

- Реализовать алгоритмы измерения и сравнения скорости вращения вала двигателя постоянного тока с помощью языка FBD (Function Block Diagram) в соответствии со стандартом МЭК 61131-3.

Синхронный генератор будет использоваться в данной работе в экспериментальных целях. Кафедра электроэнергетики предоставляет генератор модели Г-286В, который изначально был рассчитан на 14 В, 80 А ($\approx 1,12$ кВт) и представляет собой трёхфазный автомобильный генератор, применявшийся на автобусах ЛАЗ и ЗИЛ [1].

Система возбуждения обеспечивает подачу постоянного тока через обмотки возбуждения. Существует множество вариантов используемых систем возбуждения. В настоящее время в основном используются устройства с питанием от сети переменного тока, либо от генератора переменного тока, установленного на главном валу с вращающимся выпрямительным мостом, либо путем подачи переменного тока из стационарной сети выпрямления, а затем подачи постоянного тока на ротор с помощью контактных колец и щеток. В системах возбуждения постоянным током используется независимый источник постоянного тока [3].

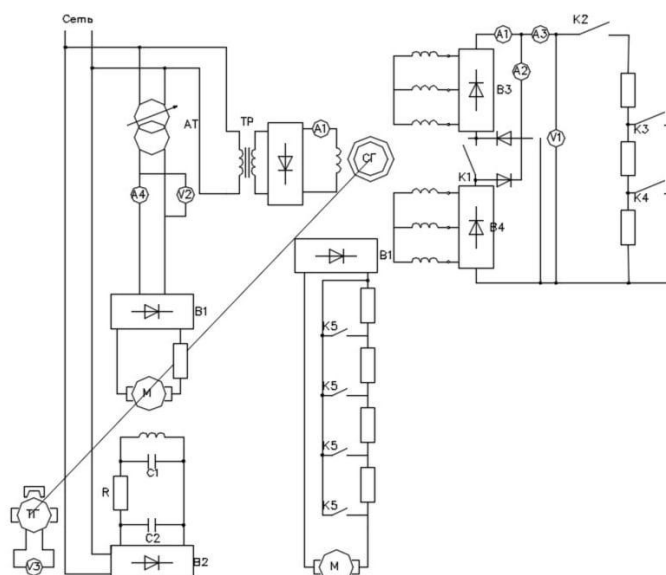


Рис. 1 - схема предлагаемого автоматического регулятора напряжения

Цифровое управление возбуждением — это современные системы возбуждения, которые часто интегрируют цифровые алгоритмы управления для контроля и изменения уровней возбуждения в соответствии с условиями работы системы и требованиями к нагрузке [2]. Особое значение имеет надежность и качество электрической энергии, поскольку перебои и колебания напряжения могут привести к серьезным экономическим потерям [4].

Аппаратно-программный стенд (АПС) предназначен для освоения схемотехники, программируемого контроллера Atmel Atmega 328, визуальных языков программирования FBD (Function Block Diagram) — графический язык программирования стандарта МЭК 61131-3.

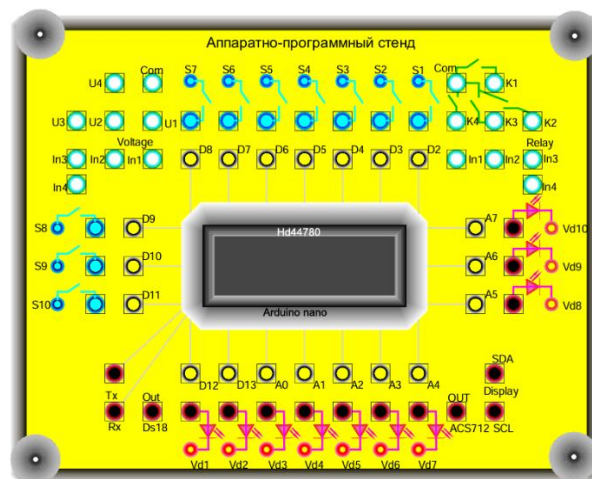


Рис. 2 - Внешний вид АПС

Методы управления с использованием микропроцессора. Для этого применялись микропроцессор Atmel SAM3X8E ARM и многофункциональное 8-канальное реле. Алгоритм работы следующий:

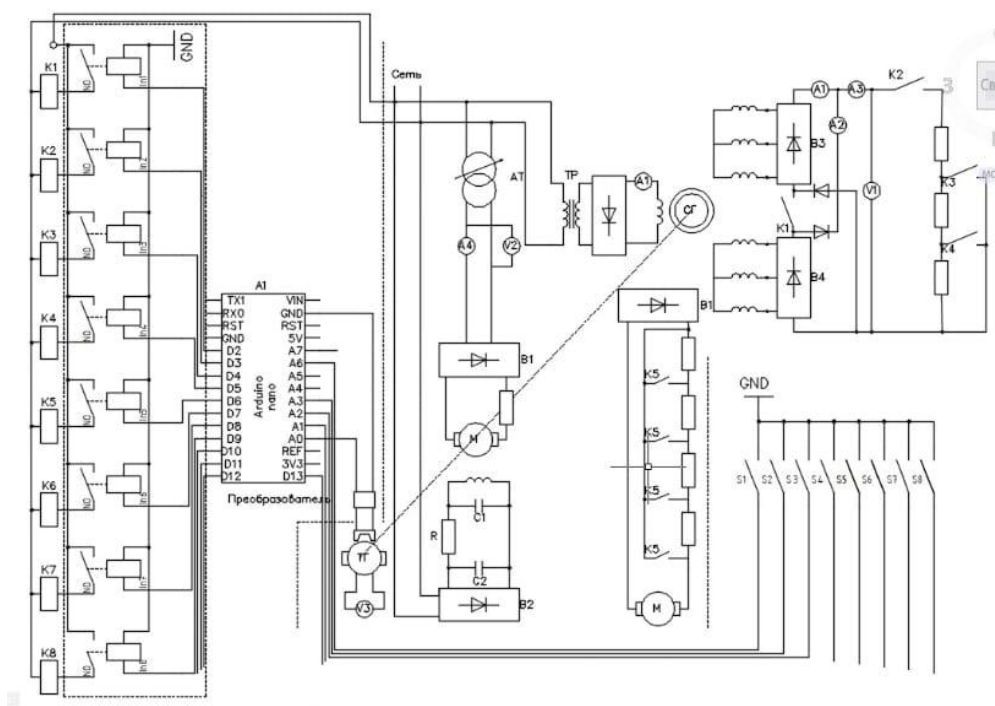


Рис. 2.1 - Электрическая визуальная схема АРН синхронного генератора

Для реализации алгоритма автоматизации экспериментального стенда синхронного генератора была использована визуальная среда программирования FLProg, которая предназначена для разработки управляющих программ для микроконтроллеров Arduino с использованием графического языка FBD (Function Block Diagram) в соответствии со стандартом МЭК 61131-3 [5].

Программирование в FLProg осуществлялось путём построения блок-схемы из готовых функциональных блоков, каждый из которых выполняет

определённую операцию (логическую, арифметическую, измерительную или управляющую). Данный подход позволил обойтись без написания текстового кода на языке Си и сделать программу более наглядной и удобной для отладки [4].

Описание системы

Автоматизация экспериментального стенда синхронного генератора [4]. Для более эффективной и точной работы вместо медленных ручных процессов была разработана и внедрена схема автоматизации экспериментального стенда синхронного генератора, которая изображена на рис. 3.

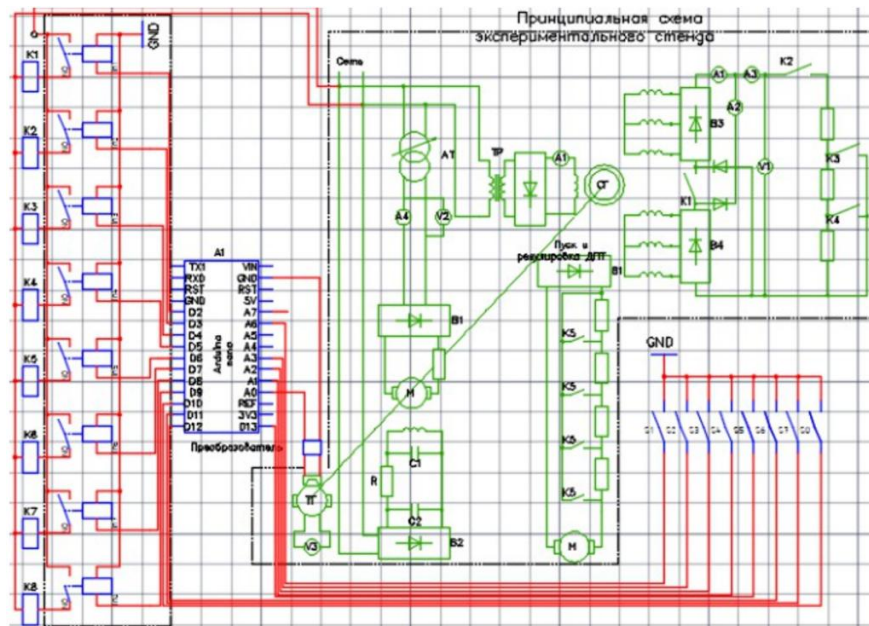


Рис.3 - Принципиальная схема АРН

Мозгом схемы является программируемый микроконтроллер Atmega 328 модуля Arduino Nano A1. Который запрограммирован следующим образом.



Рис.4 - Элемент цепи библиотечных блоков измерения и сравнения скорости вала ДПТ.

На рис. 4 изображена цепь библиотечных блоков на языке программирования FBD (Function Block Diagram) — графический язык программирования стандарта МЭК 61131-3. Блок (элемент) — это подпрограмма, функция или функциональный блок. К выходу блока подключается следующий блок, образуя цепь [5].

В нашем случае с тахометра UT371 тахогенератора сигнал контролирующей скорость вращения вала двигателя постоянного тока М поступает на аналоговый вход А0 модуля, где масштабируется (переводятся ШИМ-сигналы в напряжение) и сравнивается с опорным напряжением. Которое делит скорость вращения на «ниже» и «выше» заданной. «Ниже» включена одна обмотка якоря «выше» включается параллельно вторая, при помощи нормально-разомкнутого контакта магнитного пускателя К1.

По катушке которого бежит электрический ток через замкнувшийся контакт промежуточного реле NO_in1 восьмиканального релейного модуля RM8. На катушку которого приходит сигнал логической «1», при превышении 2,5 В на элементе сравнения см. рис.4 и отключает вторую обмотку якоря при уменьшении напряжения ниже 2,5 В.

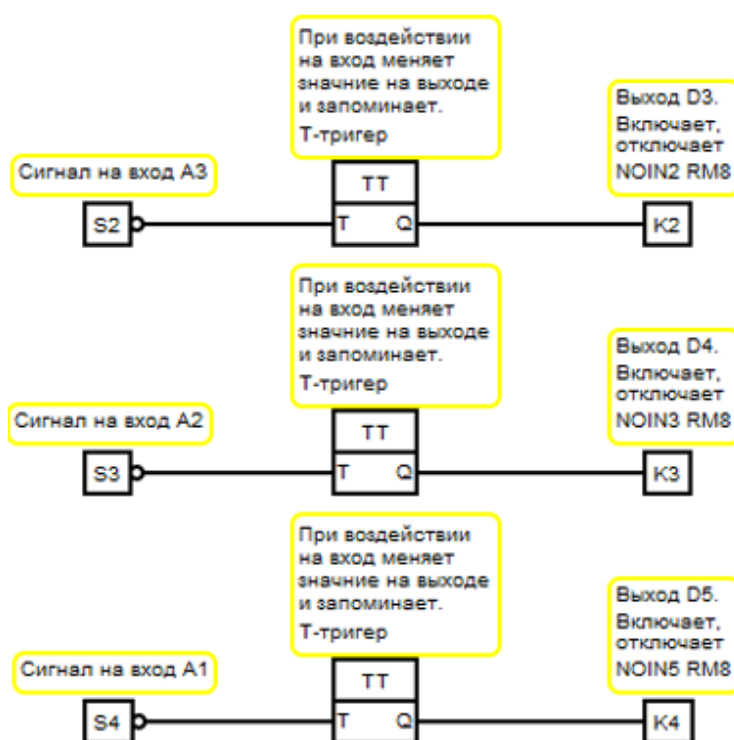


Рис.5 - Элементы цепей библиотечных блоков подключения нагрузки.

Пуск и разгон двигателя постоянного тока (ДПТ) осуществляется при подаче напряжения из сети, нажатием кнопок S5, S6, S7 и S8 сигналы которых воздействуют дискретные входы модуля A1 D10-D13 связанные с триггерами ТТ с выходов, которых фиксированный сигнал логической единицы поступает на дискретные выходы D6-D9 см. рис. 5, включая поочередно магнитные пускатели K5-K9 контакты которых шунтируют соответствующие сопротивления R см. рис. 3. При повторном нажатии кнопок S5, S6, S7 и S8 на выходе триггера ТТ меняется логическая «1» на «0» и дешунтирует соответствующее сопротивление размыкая контакт магнитного пускателя. Таким образом меняя сопротивление в обмотка якоря и частоту вращения вала ДПТ [7].

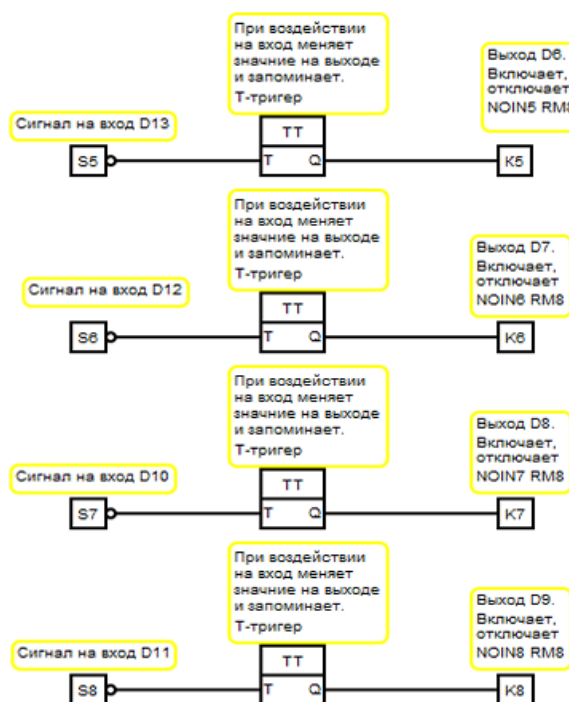


Рис.6 - Элементы цепей библиотечных блоков пуска ДПТ.

Увеличение и уменьшение нагрузки осуществляется за счет шунтирования и дешунтирования соответствующих сопротивлений с помощью нажатия кнопок S2-S4. При нечетном нажатии на выходах D3-D5 появляется логическая «1», а при четном логический «0» см. рис. 6 которые замыкают или размыкают шунтирующие контакты пускателей K2-K4 соответствующих сопротивлений см. рис. 3.

Заключение

В ходе выполненной работы была разработана и реализована система автоматизации экспериментального стенда синхронного генератора на основе микроконтроллера Atmega 328 (Arduino Nano) и среды визуального программирования FLProg, использующей графический язык FBD (Function Block Diagram) по стандарту МЭК 61131-3.

Анализ существующих систем автоматического регулирования показал, что традиционные схемы, построенные на аналоговой элементной базе, обладают ограниченными возможностями по адаптации к изменяющимся режимам работы. Использование микроконтроллеров и цифровых алгоритмов позволяет значительно повысить надёжность, быстродействие и точность регулирования напряжения синхронного генератора.

В ходе проектирования была составлена принципиальная схема автоматизации, включающая микроконтроллер, релейные модули и силовые элементы. Реализованный алгоритм обеспечивает:

- автоматическое сравнение измеренного напряжения с опорным значением;
- управление током возбуждения и скоростью вращения вала двигателя постоянного тока;

- поэтапное шунтирование и дешунтирование сопротивлений в цепи якоря;
- гибкое регулирование нагрузки на генератор.

Применение среды FLProg позволило упростить процесс разработки программы, сделать её наглядной и удобной для отладки, что особенно важно в учебных и исследовательских целях.

Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией системы в **цифровые системы управления синхронными генераторами**, внедрением средств **дистанционного мониторинга и управления**, а также использованием **интеллектуальных алгоритмов** для повышения качества и надёжности регулирования.

Список литературы

1. Пчелкин, Н. Н. Синхронные машины и их эксплуатация. — М.: Энергоатомиздат, 2010. — 356 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01004805472>
2. Kundur, P. Power System Stability and Control. — New York: McGraw-Hill, 1994. — 1176 p. <https://archive.org/details/power-system-stability-and-control-kundur>
3. IEEE Std 421.5-2016. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. — IEEE, 2016. https://standards.ieee.org/standard/421_5-2016.html
4. Arduino Team. Arduino Programming Notebook. — Arduino, 2021. <https://docs.arduino.cc/learn/programming/arduino-programming-notebook>
5. FLProg Project. FLProg Official Documentation. — <https://flprog.ru>

УДК 621.314.57

DEVELOPMENT OF THE OPERATING ALGORITHM FOR AN AUTOMATIC CONTACTLESS VOLTAGE SAG REGULATION CIRCUIT

Korjobova M.F., Jalilova D.A., Rafikova G.R.

Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent,
Uzbekistan

* e-mail: dinaramaster93@gmail.com

1 Introduction

Today, modern power systems are highly digitalized and automated, with their operational efficiency, safety, and reliability being intrinsically dependent on algorithmization technologies. The quality of electrical energy ensures the continuity and stability of power supply systems in both electrical networks and industrial enterprises. Algorithmic approaches play a crucial role in preventing deviations of voltage and frequency from their nominal values, mitigating harmonic distortions, and avoiding imbalances in load distribution. [1,2,3]. Algorithmization of power engineering devices

is the process of converting the electrical circuit and control logic of the devices into mathematical, logical, and software rules, forming a control system that implements a real-time chain of measurement–analysis–decision–action [4].

One of the main indicators of electric power quality is voltage variation. Devices designed to eliminate voltage fluctuations rely on precisely developed control algorithms to ensure high-speed operation. The primary objectives of device algorithmization are:

- Detect occurring events within fractions of a second (1–2 ms);
- Rapidly assess the amplitude and phase of the voltage during sag or swell conditions;
- Form the compensation voltage in an optimal manner;
- Ensure compliance with the device's protection and resource limits;
- Enable quick start-up while minimizing unnecessary switching operations [8].

The algorithmization of devices begins with measurement and analysis, encompassing event detection, strategy selection, control laws, as well as protection and diagnostics processes [2,4,9].

2 Main Text

In the process of mathematically modeling the circuit of a device designed to eliminate short-term voltage sags in the spinning mills of the textile industry, developing an operational sequence algorithm for the circuit facilitates the mathematical modeling process and provides a detailed description of the sequence of tasks to be performed [2,4,5]. Figure 1 below presents the circuit diagram of an automatic contactless voltage sag regulation system.

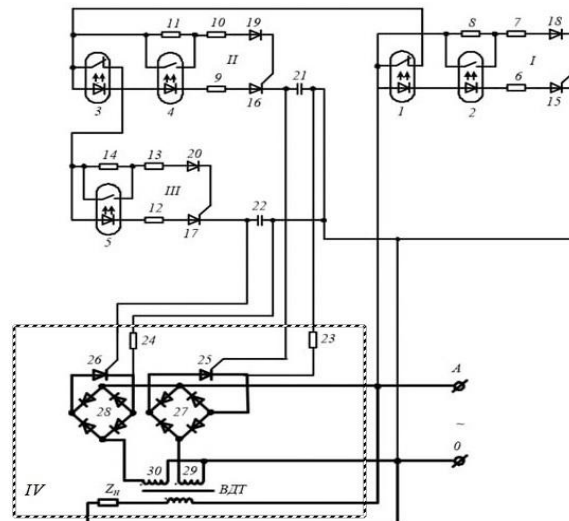


Fig. 1. - Automatic contactless voltage sag regulation circuit [6]

The circuit in Figure 1 represents the schematic of a device that compensates voltage sags in spinning mills of the textile industry. The operating sequence algorithm of this circuit is presented in Figure 2.

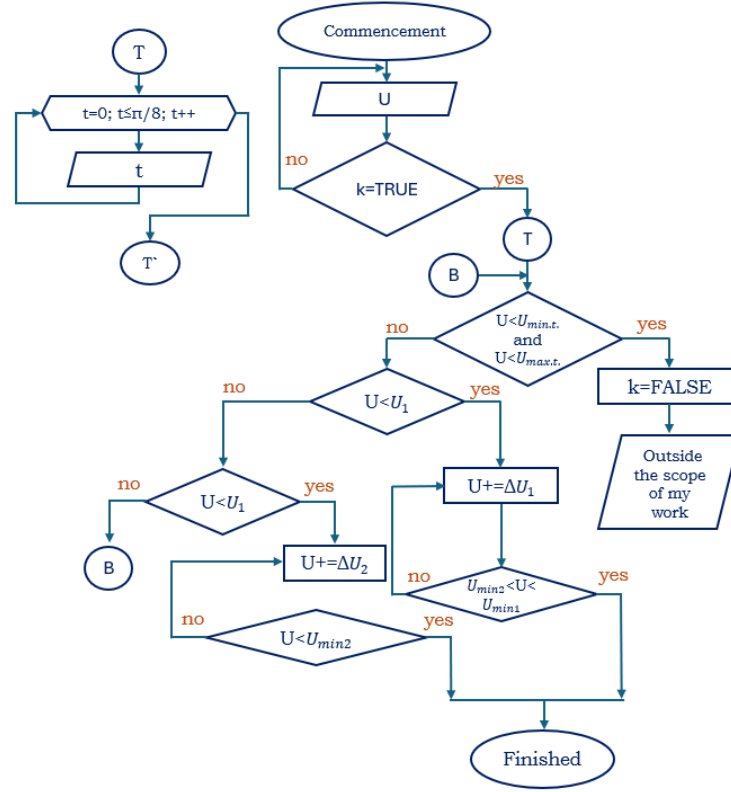


Figure 2. - Operating algorithm of the automatic contactless voltage sag regulation circuit [6]

In the algorithm presented in Figure 2, the circuit's operating sequence is depicted: first, upon initialization, the algorithm measures the primary line voltage UUU in the system and verifies the condition for enabling the regulation process [6,7]:

$k=TRUE \rightarrow$ Condition for initiating the regulation process

In the circuit shown in Figure 1, this process is executed in Section I. The second terminal of the normally closed (NC) contact of opto-relay 1 is connected to the anode of opto-relay 3 located in the sensitive zone (contactless voltage relay II), and to the first terminal of the NC contact of opto-relay 3. The first terminal of the NC contact of opto-relay 3, the first terminal of auxiliary resistor 11, and the first terminal of the normally open (NO) contact of opto-relay 4 are tied at a common node. The cathode of opto-relay 3 is connected to the anode of opto-relay 4; the latter's cathode is connected to the first terminal of resistor 9. The second terminal of resistor 9 is connected to the anode of low-power thyristor 16, whose cathode is connected to the first terminal of capacitor 21.

The gate (control electrode) of low-power thyristor 16 is connected to the cathode of low-power diode 19; its anode is connected to the second terminal of resistor 10. The first terminal of resistor 10 is connected to the second terminal of auxiliary resistor 11. The second terminal of the normally open (NO) contact of opto-relay 4 is tied at a common node with the second terminal of auxiliary resistor 11. In the algorithm, the threshold verification is carried out specifically in the sensitive Section II, and the following condition is imposed:

$$U < U_1$$

If the first condition above is not satisfied, Section III begins to operate based on the second condition. The second terminal of the normally closed (NC) contact of opto-relay 3 is connected to the anode of opto-relay 5, to the first terminal of the normally open (NO) contact of opto-relay 5, and to the first terminal of auxiliary resistor 14. The cathode of opto-relay 5 is connected to the first terminal of resistor 12; its second terminal is connected to the anode of low-power thyristor 17 of contactless voltage relay III, whose cathode is connected to the first terminal of capacitor 22 [6,7]. The gate (control electrode) of this low-power thyristor 17 is connected to the cathode of low-power diode 20; the diode's anode is connected to the second terminal of resistor 13. The first terminal of resistor 13 is connected to the second terminal of auxiliary resistor 14, and the second terminal of the NO contact of opto-relay 5 is tied at a common node with the second terminal of auxiliary resistor 14. The second terminals of capacitors 21 and 22 of contactless voltage relays II and III are interconnected and connected to the cathode of low-power thyristor 15 and to contactless voltage relay I. The second-stage regulation is carried out according to the following condition:

$$U_1 < U_2$$

The first and second terminals of capacitors 21 and 22 are connected, respectively, through resistors 23 and 24 in the actuator (Section IV) to the gate (control) electrodes of power thyristors 25 and 26, which are inserted into the diagonals of the power diode bridges 27 and 28 [10]. Simultaneously, the diode bridges are connected in series to the power-supply terminals via their windings 29 and 30. The device operates as follows: at the nominal voltage of the supply network, the control signal flowing through the chain comprising auxiliary resistor 8, resistor 7, and low-power diode 18 of the first contactless voltage relay (Relay I) is sufficient to actuate the low-voltage release. Current then flows through power thyristor 15 and, simultaneously, through the coil of opto-relay 1, the diode of opto-relay 2, resistor 6, and the low-power thyristor 15. This opens the normally closed contact of opto-relay 2, which in turn opens the normally closed contact of opto-relay 1 and closes the contact of opto-relay 2, thereby de-energizing the supply circuit of contactless voltage relays II and III and altering the reset ratio (hysteresis) of contactless voltage relay I. When the voltage value drops—for example, to U_1 the control signal to low-power thyristor 15 becomes insufficient, causing thyristor 15 to turn off and thereby de-energize opto-relay 1. The normally closed (NC) contact of opto-relay 1 then closes, and contactless voltage relay II receives power from the supply. At this moment, the control signal is sufficient to turn on low-power thyristor 16; current flows in series through opto-relay 3, opto-relay 4, resistor 9, low-power thyristor 16, and capacitor 21. This opens the NC contact of opto-relay 3 and closes the contact of opto-relay 4, while simultaneously de-energizing the power-supply circuit of contactless voltage relay III and changing the reset ratio (hysteresis) of contactless voltage relay II. When the voltage drops to U_2 , the control signal for low-power thyristor 16—flowing through the chain of auxiliary resistor 11, resistor 10, and low-power diode 19—becomes insufficient, and low-power thyristor 16 turns off. This de-energizes opto-relay 3 and, by changing the reset ratio (hysteresis) of contactless voltage relay II, causes the normally closed contact of opto-relay 3 to

close and the contact of opto-relay 4 to open, thereby enabling contactless voltage relay III. When contactless voltage relay III is energized, the control signal flowing in series through auxiliary resistor 14, resistor 13, and low-power diode 20 is sufficient to trigger low-power thyristor 17. Current then passes through opto-relay 5, resistor 12, and low-power thyristor 17, charging capacitor 22. From the first and second terminals of capacitor 22, a gate (control) signal is applied via resistor 24 to power thyristor 26; power thyristor 26 turns on, thereby connecting the boost transformer winding 30 to the network. The foregoing conditions operate under the time-cycle constraints $t=0$; $t>5\pi/8$; $t++$; with branching for $t\leq\pi/8$.

3 Conclusion

Thus, in industrial facilities—particularly spinning mills—algorithmization is not only essential for ensuring electric power quality, but also one of the key factors in improving overall system efficiency. Algorithmic approaches enable real-time monitoring, control, and forecasting. In this study, the proposed algorithm employs the additional windings of a boost transformer—actuated within a time interval of $\pi/8$ —installed on the low-voltage side of the spinning mill substation, thereby preventing stoppages of the plant’s technological process when short-duration voltage sags below nominal occur. The algorithm’s stepwise regulation strategy, timer-based time management, and threshold-based protection functions make it well suited for application in modern industrial power-supply systems.

References

1. IEEE Standard 1159-2019, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. IEEE, 2019.
2. Mohamed, A., and Shareef, H., *Power Quality: Monitoring, Analysis and Enhancement*. Springer, 2018.
3. Venkatesh, B., *Computational Methods for Electric Power Systems*. CRC Press, 2018.
4. Chen, L. (2020). The textile industry's guide to sustainable energy. Beijing: China Textile Press.
5. Rakhmanov I.U. Methodology of upravleniya elektropotrebleniem promyshlennyyx predpriyatiy s nepreryvnym kharakentom proizvodstva. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepi doktor nauk (DSc) po tekhnicheskim naukam - Tashkent-2022.
6. Jalilova D.A. Improving energy efficiency of yarn-spinning enterprises based on ensuring the continuity of technological processes (on the example of the “WBM ROMITEX DIROMM”). Dissertation. PhD, Tashkent -2023, -S. 168.
7. Raxmonov I.U., Najimova A.M., Jalilova D.A. Forecasting electricity consumption in cotton-textile cluster enterprises. Monograph. ToshDTU printing house, Tashkent, 2021 - 163 pages.
8. Khoshimov F.A., Rakhmonov I.U., Jalilova D.A. Methody otsenki rezervov ekonomii elektroenergii na promyshlennyyx predpriyatiyax. Nauchno-tekhnicheskiiy

zurnal "Problemy energo-i resursosberezheniya". Tashkent, 2021. - №4. S. 200-208 (05.00.00; #21).

9. Rakhmanov I.U., Jalilova D.A. Rationalization of the mode of operation of ventilation and water supply and ventilation of enterprises and enterprises of textile industry. Academic. "The problem of science". ISSN 2412-8236, No. 8. December 2021, S. 13-14 (05.00.00; №71).

10. Niyozov N.N., Rikhsitillaev B.Kh., Jalilova D.A., Kuatbaev P.M. Forecasting of electricity consumption by industrial enterprises with a continuous nature of production based on the principal component method (PCA). Energy Systems Research 2023 E3S Web of Conferences 384, 01031 (2023) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338401031>.

УДК 620.92

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ НА РАБОТУ ЦИФРОВЫХ РЕЛЕЙНЫХ ЗАЩИТ

Косы Н.А.

Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева
e-mail: nurkosy03@gmail.com

Аннотация

В данной статье рассматривается анализ влияния электромагнитных помех на работу цифровых релейных защит.

Проведен анализ воздействия и методов борьбы с электромагнитными помехами возникающими в цифровых релейных защитах, которые влияют на правильность срабатывания защиты (т.е. предотвращения ложного срабатывания).

Ключевые слова: электромагнитные помехи, ЦРЗ, РЗА.

Введение

Проблема электромагнитной совместимости электронной аппаратуры (ЭМС) возникла вместе с самой этой аппаратурой, поскольку одни ее узлы функционально построены таким образом, что являются приемниками электромагнитного излучения, тогда как другие — источниками излучения. Проблемы возникали как из-за взаимного влияния одних узлов на другие внутри аппаратуры, так и при воздействии на электронную аппаратуру внешних излучений различного происхождения. Современная ЦРЗ оказалась весьма чувствительна к электромагнитным помехам, поступающим «из воздуха», по цепям оперативного тока, цепям напряжения и от трансформаторов тока. Отмечались случаи ложного срабатывания ЦРЗ даже от мобильного телефона [1].

Между тем, взаимосвязь между промышленным оборудованием становятся все более сложными, поэтому проблема электромагнитных помех становится все более актуальной. Использование преобразователей частоты и других силовых электронных устройств в энергетических системах растет, и эти устройства могут вызывать гармоники и другие электромагнитные помехи. Это потенциально влияет на другие устройства и системы управления в энергетической системе.

Электромагнитные помехи, возникающие на электрических станциях и подстанциях, воздействующих на устройства РЗА это результат образования электромагнитных полей. В результате проведенного анализа в большом временном промежутке можно выделить ряд источников электромагнитных помех. В основном источниками таких воздействий в реальном времени могут быть: импульсные помехи при ударах молнии; помехи при коммутациях в распределительных устройствах; однофазные замыкания на землю в распределительных устройствах 1 кВ и выше.

Жесткость электромагнитной ситуации зависит непосредственно от условий размещения устройств РЗА, качества монтажа технических средств, вида системы питания устройств РЗА, экранирующих свойств помещения, эффективности применяемого заземления, монтажных условий в помещении (использование помехоподавляющих средств, сетевых фильтров, экранов, а также защит от перенапряжения и пр.) [2].

Материалы и методы возникновения электромагнитных помех

Для обеспечения надежной и эффективной работы цифровых устройств РЗА на основе микропроцессоров необходимо знать рабочие характеристики среды, в которой будет эксплуатироваться данное устройство. Иными словами, цифровое устройство должно быть совместимо с параметрами внешней среды. Это является достаточно сложной задачей, поскольку внешняя среда, выполняя по отношению к цифровому устройству на основе микропроцессоров ряд полезных функций (обмен информационными сигналами, электроснабжение, управляющие и ремонтирующие воздействия), одновременно является источником нежелательных воздействий.

К возмущающим воздействиям со стороны внешней среды могут быть отнесены механические (вибрации, удары), климатические (изменения температуры, влажности, запыленность и т.п.) и электромагнитные.

Все возникающие помехи и возмущающие воздействия можно классифицировать по их виду и форме, источнику образования и механизму проникновения в схему.

По месту возникновения помехи подразделяют на внутренние и внешние. К внутренним помехам, как правило, относят шумы и наводки. Внутренние шумы связывают с тепловым шумом, контактным и импульсным шумом

Тепловой шум создается в результате теплового движения частиц в веществе, которое создает сопротивление. Дробовой шум вызывается

прохождением тока через потенциальный барьер в лампах и полупроводниковых приборах. Контактный шум образуется в результате флуктуации проводимости по причине недостаточного контакта между двумя материалами. Импульсный шум обуславливается производственными дефектами в конструкции полупроводниковых приборов.

Внешние помехи условно можно разделить на промышленные (результат вращения двигателей, срабатывания реле, контакторов, возникновения замыкания на землю и т.п.) и атмосферные (возникающие при молниях, либо вспышках солнечной активности). Внешние помехи без учета источника их возникновения могут быть подразделены на помехи из питающей сети, из внешних линий связи (информационных цепей), в результате возникновения разрядов статического электричества, а также проявляющаяся в виде напряжения произвольной формы между фазным и нулевым или двумя фазными проводами от источника первичного электропитания, или между вводами проводов линии связи микропроцессора, будет являться симметричной помехой. Помеха микропроцессорной релейной защиты, образованная вводом провода от источника первичного напряжения или в месте соединения провода линии связи микропроцессора с зажимом заземления ее проводящего корпуса — несимметричной помехой [3].

По характеру протекания процесса во времени помехи подразделяют на импульсные и флуктуационные.

Импульсные помехи представляют собой последовательность импульсов или одиночный импульс, имеющий произвольную форму. Его длительность достаточна для изменения состояния запоминающих или управляющих элементов. Форма импульсных помех зависит от переходного процесса, возникающего после коммутации цепи, являющейся источником помех. Флуктуационные помехи представляют собой нечто иное как непрерывный во времени случайный процесс. Форма флуктуационных помех может быть представлена как совокупность синусоидальных затухающих колебаний, с переходом в несинусоидальные периодические колебания.

Источники помех в большинстве случаев разнообразны. Это объясняется тем, что любое изменение напряжения или тока в какой-либо электрической цепи, устройстве, аппарате может быть источником промышленных электрических помех. Классификации источниками возникновения помех на электрических станциях и подстанциях могут быть:

- возникновение электрической короны на линейных изоляторах линий электропередач (ЛЭП);
- колебания напряжения при волнах коммутационных перенапряжений, набегающих с ЛЭП;
- короткие замыкания на землю, приводящие к токам, протекающим через контур заземления подстанции;
- коммутации контактов реле различных индуктивных нагрузок (обмотки реле, пускатели, двигатели и т.п.);

- наличие высших гармонических составляющих напряжений генераторов электростанций и нагрузки;
- формирование наводок на ЛЭП от атмосферных разрядов и мощных радиопередающих устройств и т.п.

Кроме этого, достаточно частыми, а поэтому и наиболее опасными кратковременными помехами, имеющими значительную амплитуду, являются действия, выполняемые коммутационными аппаратами-выключателями и, особенно, разъединителями.

По механизму проявления на входах цифровых устройств все помехи можно разделить на несколько категорий:

- помехи, проявляющиеся на входах цифрового устройства, проникающие через распределенную емкость между цепями устройства и электрической сетью;
- помехи, образующиеся на входе цифрового устройства за счет наличия магнитных связей с некоторыми из токовых цепей;
- помехи, возникающие за счет образования заземленных контуров, которые обуславливаются общим заземляющим проводом для различных цепей;
- кондуктивные помехи - помехи, проявляющиеся в цепях в результате изменения изоляции;
- помехи из питающей сети, образующиеся на входе устройства;
- помехи от электромагнитного поля излучения, которое вызывается излучением радиопередатчика на свойственной только ему частоте или другого источника электромагнитного излучения, при расположении микропроцессорного устройства на таком удалении, которое позволяет исключить влияние паразитных емкостной и индуктивной связей между источником помех и микропроцессорным устройством [3].

В то же время различные технологии подавления помех имеют свою сферу применения и ограничения, поэтому выбор метода зависит от ситуации на промышленном предприятии. Кроме того, методы подавления помех не являются независимыми, и многие технологии часто можно использовать вместе для достижения лучшего эффекта подавления помех.

Электрические и магнитные поля можно разделить на постоянные и переменные. Постоянное электрическое поле в основном генерируется источником постоянного тока или электростатическим полем, а постоянное магнитное поле в основном генерируется постоянными магнитами или источником постоянного тока. Влияние постоянного поля на электронное оборудование в промышленности является фиксированным. Оно может проявляться в виде постоянных электрических и магнитных полей, отклоняющих электронный луч в трубке осциллографа, электростатической индукции, электризирующей объекты, постоянного магнитного поля, отклоняющего стрелку прибора, и т. д.

Однако, поскольку влияние постоянного поля на электронное оборудование в основном фиксировано, оно не вызывает нерегулярных изменений

электрического сигнала. Поэтому его называют только влиянием, а не помехой. Переменные электрические и магнитные поля часто случайным образом меняют полярность, частоту, направление и интенсивность, демонстрируя случайность и возмущение. Поэтому влияние переменных полей называется электромагнитными помехами.

Согласно принципу, причиной электромагнитных помех является нерегулярное изменение электрических и магнитных полей. Таким образом, теоретически электромагнитные помехи возникают при быстром изменении тока. В промышленности основными источниками таких помех являются реле, контакторы переменного тока, электроножевые выключатели и регуляторы частоты.

Существует два основных пути передачи электромагнитных помех: энергия электромагнитных помех распространяется в виде электромагнитных волн через электрическое или магнитное поле в пространстве, что приводит к взаимодействию между источником помех и возмущаемым телом.

Энергия электромагнитных помех распространяется по линии электропередачи или сигнальному кабелю в виде напряжения или тока. Ее очень трудно устранить, поскольку она распространяется только по цепи, а быстрые изменения тока и напряжения практически неизбежны [4].

Методы подавления влияния электромагнитных помех

Для образования электромагнитных помех необходимо наличие следующих трех факторов: источник электромагнитных помех, чувствительное оборудование и канал связи. Поэтому подавление помех следует начинать с двух следующих аспектов: уменьшение излучения радиочастотной энергии и уменьшение поступления радиочастотной энергии в устройство.

Электромагнитное экранирование основано на принципе металлической изоляции для блокирования передачи энергии помех. Экранирование можно классифицировать по разным принципам: Во-первых, экранирование электростатического поля в основном используется для предотвращения влияния электростатического поля. Принцип заключается в том, что под действием внешнего электростатического поля заряд на поверхности проводника перераспределяется таким образом, что суммарная напряженность поля внутри проводника равна нулю. Такой вид экранирования требует идеального экранирования и хорошего заземления. Во-вторых, экранирование магнитного поля в основном используется для предотвращения влияния внешних статических магнитных полей и низкочастотных токовых магнитных полей. Принцип заключается в использовании материала с высокой проницаемостью для создания небольшого магниторезистивного пути, чтобы ток и магнитное поле протекали в экранирующем корпусе для достижения экранирования магнитного поля. Наконец, электромагнитное экранирование, в основном для предотвращения влияния переменных электрических полей и переменных магнитных полей, представляет собой метод применения магнитных материалов

и металлов для ослабления или подавления магнитных полей и электромагнитных полей. Электромагнитное экранирование требует не только хорошего заземления, но и хорошей электрической проводимости экрана, при этом ни один проводник не может проходить через экран.

Технология фильтрации представляет собой операцию по отфильтровыванию частоты определенного диапазона в сигнале. Это важное средство для ограничения проводимых помех электрического оборудования и повышения уровня противодействия помехам электрического оборудования. Суть заключается в том, что когда частотный спектр помех отличается от частотного диапазона, фильтр применяется для устранения помех. Классический фильтр — это схема, которая пропускает только сигналы в определенном диапазоне частот и предотвращает или ослабляет прохождение сигналов другой частоты. По сравнению с классическими фильтрами, современные фильтры могут использовать частотные характеристики схемы для выбора сигналов различной частоты, например, фильтры верхних частот, фильтры нижних частот, полосовые фильтры и полосовые фильтры-подавители.

В электронном оборудовании заземление является важным методом подавления помех. Сочетание заземления и экранирования может решить большинство проблем с помехами. В промышленном измерении и контроле существует три распространенных технологии заземления. Первая — это заземление безопасности, которое означает подключение корпуса высоковольтного оборудования к земле для предотвращения накопления заряда и повреждения изоляции человеческого тела. Следующая — рабочее заземление. При строительстве персонал должен принять эффективные меры для обеспечения опорного проводника или потенциальной точки для нормальной работы всей схемы системы. В-третьих, заземление различных экранирующих слоев, то есть экранирующее заземление. Экранирующая система и система заземления объединены для достижения идеального экранирующего эффекта.

При эксплуатации промышленных систем сам кабель или провод является как источником, так и приемником помех. Поэтому расположение и прокладка кабелей оказывают большое влияние на ЭМС. Необходимо принять определенные меры для подавления помех в проводке системы. Например, цифровые, аналоговые и силовые цепи размещаются отдельно, а высокочастотная цепь отделена от низкочастотной, чтобы свести к минимуму связь между ненужными сигналами [4].

Заключение

Исходя из выше написанного можно прийти к такому результату различные системы, на которых установлены ЦРЗ будут подвергаться электромагнитным помехам различной степени. Электромагнитные помехи могут ухудшать качество связи в системах связи, изменять результаты измерений в измерительных системах и влиять на работу систем управления. Помимо

снижения эффективности и качества системы, в серьезных случаях это может привести к авариям, связанным с безопасностью.

Вывод заключается в том, чтобы для уменьшения влияния электромагнитных помех на промышленных системах часто должны использоваться методы борьбы с электромагнитными помехами такие как: электромагнитного экранирования, фильтрации, заземления и прокладки кабелей.

Следует отметить, что для разных видов помех должны применяться разные стратегии противодействия. Например, выбирать различные материалы электромагнитного экранирования в зависимости от рабочей среды оборудования, выбирать различные фильтры в зависимости от частотного диапазона и т. д. Применение правильных средств противодействия помехам является ключом к улучшению электромагнитной совместимости защиты и в целом самой системы.

Таким образом, исходя из реальной ситуации на промышленном объекте, возникновение электромагнитных помех неизбежно, и существующие средства не могут полностью устранить электромагнитные помехи. Поэтому цель борьбы с помехами на промышленных объектах заключается в том, чтобы попытаться уменьшить влияние электромагнитных помех на ЦРЗ и обеспечить нормальную работу системы. Хотя существует много средств борьбы с электромагнитными помехами, конкретный метод должен быть выбран под конкретную ситуацию. Но, на практике на данный момент часто используют заземление и электромагнитное экранирование, а фильтрация используется сравнительно меньше, по причине дороговизны метода.

Список литературы

1. Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. URL: <https://kit-e.ru/problema-elektromagnitnyh-vozdeystvij-na-mikroproczessornye-ustrojstva-relejnoj-zashhity/>
2. Влияние электромагнитных полей на работу устройство релейной защиты и автоматики URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-elektromagnitnyh-poley-na-rabotu-ustroystvo-releynoy-zaschity-i-avtomatiki/>
3. Возникновение и влияние электромагнитных помех на микропроцессорные устройства релейной защиты URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozniknovenie-i-vliyanie-elektromagnitnyh-pomeh-na-mikroprotsessornye-ustroystva-releynoy-zaschity/>
4. Guanqi Niu. Analysis and Protection of Electromagnetic Interference in the Industrial Field. URL: <https://clck.ru/3PKHou>

SHORT-TERM OPERATIONAL PLANNING OF DISTRIBUTION NETWORKS WITH ACTIVE POWER LOSS CONSIDERATION

Makhmudov T.F.

Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

email: t.maxmudov@tdtu.uz

Introduction. The increasing complexity of modern distribution networks, driven by the high penetration of renewable energy sources, distributed generation, and flexible loads, has intensified the need for advanced operational strategies. Among the key challenges faced by distribution system operators is the minimization of active power losses, which significantly affects system efficiency, operational costs, and voltage stability [1-2]. Although historically treated as a secondary objective, the reduction of network losses has become increasingly important in the context of smart grid development and energy transition goals [3].

Short-term operational planning of distribution systems, typically spanning from several minutes to a few hours ahead, plays a critical role in ensuring reliable and cost-effective operation [4]. This type of planning must consider dynamic variations in load demand and renewable generation, requiring accurate forecasting, responsive control mechanisms, and optimization-based decision-making. In this context, incorporating the minimization of active power losses into short-term planning objectives leads to enhanced network performance, reduced energy waste, and improved power quality [5-6].

Conventional methods for loss minimization often rely on deterministic optimal power flow formulations [7]. However, recent advancements propose more comprehensive models that include uncertainty handling, distributed energy resources, and real-time data analytics. Furthermore, quasi-dynamic simulation tools - such as those implemented in DIgSILENT PowerFactory - enable time-series evaluation of network states, facilitating the estimation of losses across discrete time intervals under realistic operational conditions [8-9].

Methods and algorithms. This study proposes using a battery energy storage system as a second energy source and for redistributing active power flows. The daily period is proposed to be divided into 48 time intervals of 30 minutes each. The BESS power management strategy should take into account charge-discharge cycles, i.e., the SOC level at the beginning of the first time interval and the last interval should be equal. Load profiles are formed based on the results of short-term forecasting.

The algorithm works as follows: input data regarding the topology of the distribution network and the time intervals when the BESS will switch to charge or discharge mode are entered; the time intervals are considered; if the time interval under consideration belongs to the charging interval t_{ch} , then the BESS power changes from $-P_{BESS\_max}$ to zero (charging mode), while the steady state and total active power losses are calculated. Then, the P_{BESS} value at which the total active power losses were minimal is determined. If the time interval does not belong to the charge interval t_{ch} ,

then the BESS power changes from zero to $P_{\text{BESS\_max}}$ (discharge mode), while the steady state and total active power losses are also calculated. Thus, all time intervals are considered with the determination of the P_{BESS} power value for each time interval.

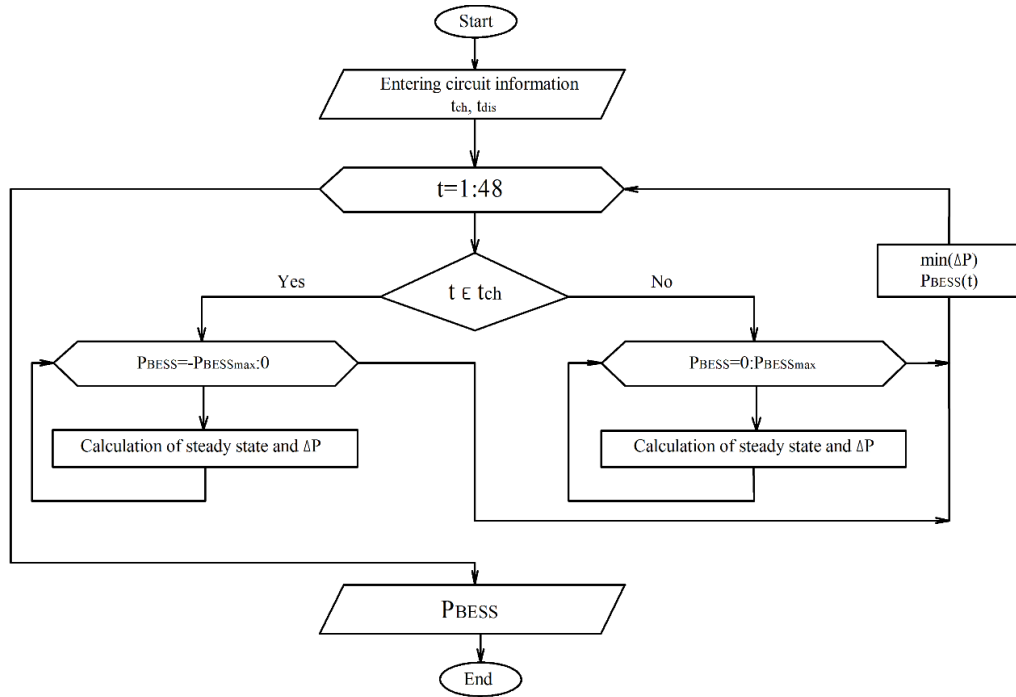


Fig. 1. - Algorithm for determining BESS power

Modelling. We will use a distribution network (Fig. 2) consisting of 11 nodes as the model under study. Node 1 was taken as the slack node.

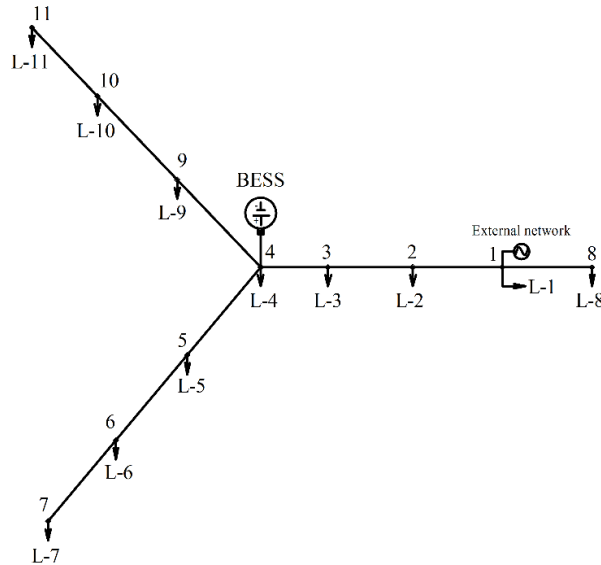


Fig. 2. - Test diagram of the electrical distribution network

The installed capacity of the battery storage system shown in Fig. 2 is 3000 kW, and the capacity is 50,000 kWh.

Schematic information on the nodes and branches is given in Tables 1 and 2.

Table 1. Node data

Node	U_{nom} , kV
1	10
2	10
3	10
4	10
5	10
6	10
7	10
8	10
9	10
10	10
11	10

Table 2. Branch data

Beg.	End	R, Ohm	X, Ohm
1	8	0.0612	0.0562
1	2	0.057	0.068
2	3	0.073	0.081
3	4	0.0095	0.0088
4	9	0.059	0.068
4	5	0.0745	0.0921
9	10	0.0235	0.0467
10	11	0.0543	0.0626
5	6	0.054	0.067
6	7	0.0385	0.0438

Results. Figure 3 shows the daily load graph for the distribution network.

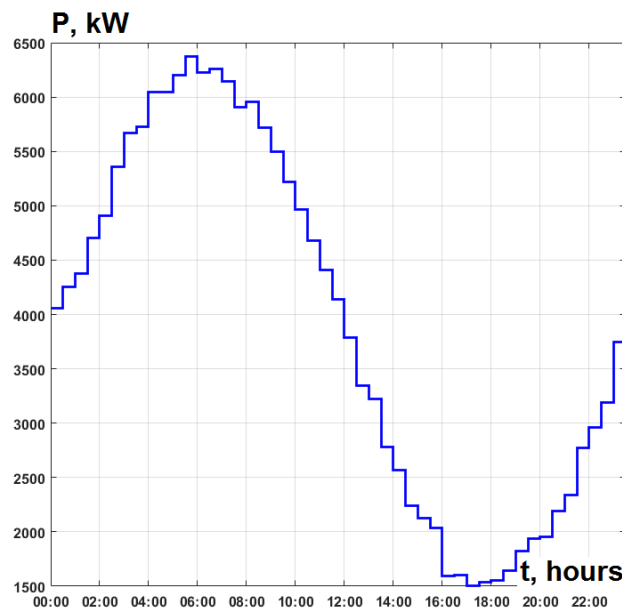


Fig. 3. - Daily load schedule

Based on the algorithm (Fig. 1), the power values of the battery energy storage system were determined for each time interval (Table 3).

Table 3. Changes in BESS power

Time	P_{BESS} , kW	Time	P_{BESS} , kW
0:00	200	12:00	200
0:30	400	12:30	-500
1:00	600	13:00	-600
1:30	900	13:30	-1100
2:00	1100	14:00	-1400

2:30	1500	14:30	-1600
3:00	1800	15:00	-1800
3:30	1800	15:30	-1900
4:00	1900	16:00	-2200
4:30	1900	16:30	-2200
5:00	2100	17:00	-2300
5:30	2300	17:30	-2300
6:00	2000	18:00	-2300
6:30	2000	18:30	-2200
7:00	1900	19:00	-2100
7:30	2000	19:30	-1900
8:00	2000	20:00	-1900
8:30	1800	20:30	-1700
9:00	1600	21:00	-1600
9:30	1300	21:30	-1100
10:00	1100	22:00	-1000
10:30	900	22:30	-700
11:00	500	23:00	100
11:30	300	23:30	200

Figure 4 shows the characteristics of changes in total active power losses in the distribution network under study over a 24-hour period.

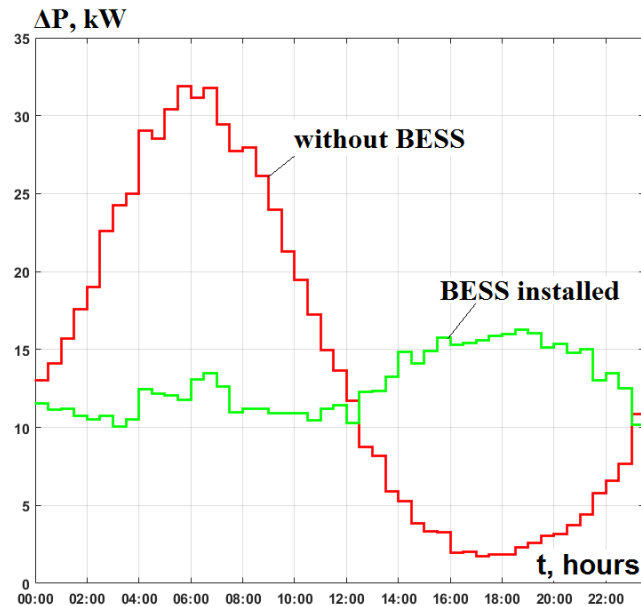


Fig. 4. - Curves showing changes in total active power losses

Figure 4 shows that the installation of BESS has dramatically changed the active power loss profile in the distribution network. This is due to changes in power flows from the external network: during peak load hours, BESS is in discharge mode, thereby reducing the load on the distribution network elements and contributing to a reduction

in losses. During off-peak hours, the BESS switches to charging mode, causing active power losses to increase.

Conclusion. The results of modelling using a test distribution network with 11 nodes showed that the application of the proposed BESS control strategy significantly reduces active power losses during peak load periods. The results show that the integration of BESS into short-term planning aimed at minimising losses provides significant technical advantages. The developed algorithm is adaptable to other network configurations and can be extended by including more realistic elements such as demand uncertainty, variable generation, and electricity tariffs.

List of references

1. A. J. Conejo, E. Castillo, R. Minguez, and F. Milano, "Locational marginal price sensitivities," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 4, pp. 2026–2033, Nov. 2005. DOI: 10.1109/TPWRS.2005.857957
2. J. Kennedy and N. Jenkins, "A stochastic model for transmission network investment planning under demand uncertainty," *Electric Power Systems Research*, vol. 104, pp. 28–33, Oct. 2013. DOI: 10.1016/j.epsr.2013.05.003
3. A. Mohamed, O. Mohammed, and Y. B. Atalay, "Multiobjective optimization for smart grid planning under uncertainty," *Renew. Energy*, vol. 100, pp. 332–343, Feb. 2017. DOI: 10.1016/j.renene.2016.08.038
4. F. Capitanescu, "Critical review of recent advances and further developments needed in AC optimal power flow," *Electric Power Systems Research*, vol. 136, pp. 57–68, Jul. 2016. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.02.008
5. S. Ghosh, P. K. Roy, and S. Paul, "Forecasting load and minimizing losses in smart grid using machine learning," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 79845–79856, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3084971
6. M. R. Sarker and D. S. Kirschen, "Optimal operation and services scheduling for an industrial microgrid," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 115–127, Jan. 2017. DOI: 10.1109/TSTE.2016.2586084
7. J. Qiu, Y. Xu, Z. Y. Dong, and R. Zhang, "Loss-aware coordination of PV and BESS in distribution systems," *Appl. Energy*, vol. 251, pp. 113345, Oct. 2019. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113345
8. B. A. Robbins and A. D. Domínguez-García, "Optimal reactive power dispatch for voltage regulation in unbalanced distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, pp. 2903–2913, Jul. 2016. DOI: 10.1109/TPWRS.2015.2453771
9. D. K. Molzahn and I. A. Hiskens, "A survey of relaxations and approximations of the power flow equations," *Found. Trends Electr. Energy Syst.*, vol. 4, no. 1–2, pp. 1–221, 2019. DOI: 10.1561/31000000006

МУНАЙ ҚҰБЫРЫ СОРҒЫЛАРЫНЫҢ ЭЛЕКТР ЖЕТЕГІНДЕ ҚОЛДАНЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯ ҮНЕМДЕЙТІН АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫ ЖОБАЛАУ

Нурмадиева Э.А., Ғали К.О.

Ғ.Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті

Андатпа. Ортадан тепкіш сорғылар қозғалтқыштарының жұмыс режимдерінің ерекшеліктерін талдау негізінде объектіге бағытталған асинхронды қозғалтқыштардың геометриялық параметрлерін статор орамасындағы қуат шығындарын азайту критерийі бойынша оңтайландыру ұсынылады.

Статор орамасында шығынды төмендететін асинхронды қозғалтқыштың геометриялық параметрлерін анықтау тапсырмасы электрмагниттік жүктемелердің таңдалған мәндерімен және өзекшенің көлемі тұрақты болған жағдайдағы шарттар кезінде қойылады. Есептеулер нәтижесінде β параметрінің тіркелген мәндері кезіндегі орама қадамынан асинхронды қозғалтқыш статорындағы қуаттың шығындар тәуелділігі алынады.

Ортадан тепкіш сорғылардың электр жетегіндегі энергетикалық көрсеткіштерді жоғарлату электр жетегі жүйесін таңдау, басқару алгоритімін құру және де басқа сұрақтардан тұратын көп жақты тапсырма болып табылады. Бұл жұмыс қозғалтқыштағы шығынды төмендету тапсырмасын шешу үшін оның геометриялық қатынастарын оңтайландыруға негіз бола алады.

Түйін сөз. Асинхронды машина, статор орамасы, электр шығыны, орама қадамы, жиілік түрлендіргіші, ортадан тепкіш сорғы.

Қазіргі уақытта алдыңғы қатарлы әлемдік өндірушілер «жиілік түрлендіргіш – асинхронды қозғалтқыш» (ЖТ-АҚ) сұлбасы бойынша вентильді түрлендіргіштерден басқарылатын электр жетектерді ұсынып отыр.

Элементтік базаны үздіксіз заманауи түріне ауыстыру мұндай жетектердің массалық-габариттік, энергетикалық және пайдалану көрсеткіштерін айтарлықтай жақсартуға мүмкіндік берді.

Жиіліктік басқару – асинхронды қозғалтқыштың айналу жиілігін бірқалыпты реттеудің ең үнемді тәсілі болып саналады, өйткені ол бүкіл реттеу диапазонында ротордың аз сырғанауымен (аз сырғанау шығындарымен) жұмыс істейді, жоғары ПӘК-ке ие және механикалық сипаттамалардың жоғары қатандығын қамтамасыз етеді.

Алайда, бүгінде нарықта ұсынылып отырған жинақты электр жетектер, соның ішінде олардың құрамында қолданылатын асинхронды қозғалтқыштар жалпы өндірістік сипатқа ие, ал ортадан тепкіш механизмдердің жұмыс ерекшелігін ескермеуі олардың энергия тиімділігін төмендетеді.

Электр жетектің дамуының бір бағыты, біздің ойымызша, объектіге бағытталған жүйелерді құру, атап айтқанда, ортадан тепкіш жүктемеге бейімделген энергия үнемдеуші электрқозғалтқышты әзірлеу, осы қозғалтқышты жиіліктік басқарудың оңтайлы заңдарын құрастыру, яғни жалпы алғанда энергия үнемдейтін электр жетек жасау болып табылады.

Электр машиналарын жобалау кезінде берілген номиналды қуат және айналу жиілігі, электромагниттік жүктемелер, максималды (критикалық) және іске қосу моменттері негізге алынады.

Әртүрлі мақсаттағы (сумен-жылумен жабдықтау, канализация, магистральдық сорғылар және т.б.) ортадан тепкіш агрегаттардың жұмыс режимдерінің ерекшеліктерін зерттеу олардың электр жетектеріне қойылатын ортақ және ерекше талаптарды анықтауға мүмкіндік береді.

1. Ортадан тепкіш агрегаттар басым көпшілігінде ұзақ уақыттық жұмыс режиміне ие механизмдер болып табылады. Жұмыс жағдайының ұзақтығы тәулік пен айларға дейін созылуы мүмкін. Сондай-ақ орнатылған қуаттың едәуір көлемін (магистральдық сорғылар үшін 2 МВт-қа дейін) ескергенде, мұндай механизмдердің электр жетегінің өзінде энергия шығындарын азайту мәселесі маңызды болып табылады.

2. Қозғалтқыштың іске қосу және максималды моментіне қойылатын талаптар екінші кезекке ысырылады. Бұл, біріншіден, МҚД-ның механикалық сипаттамасымен байланысты, ол қозғалтқыш білігінің айналу жиілігіне (ω) тәуелді кедергі моментінің квадратиктік функциясы түрінде болады. Іске қосу кезінде кедергі моменті тек қозғалысқа келтіру моментімен анықталады және номиналды мәннің 5 %-ынан аспайды. Бұдан басқа, қазіргі заманғы электржетектің құрамындағы қозғалтқыш айналу жиілігі бойынша реттелетін болып табылады.

3. Машинаның габаритіне, мысалы, кеменің, ұшақтың немесе тартқыш электр жетектеріндегі сияқты, қатаң талаптар қойылмайды, әңгіме тек ақылға қонымды геометриялық өлшемдер мен материал шығындарының шегінде жүреді (әдеттегі сериялық қозғалтқыш параметрлері аясында).

Осылайша, ортадан тепкіш агрегаттарға арналған қозғалтқыштарды жобалаудағы негізгі критерий ретінде АҚ-тағы қуат шығындарын барынша азайтуды қарастыру қажет [1,2].

Бірінші кезеңде электромагниттік жүктемелердің мәндері таңдалып, сәйкес қуаттағы жалпы өндірістік асинхронды қозғалтқыштардың көрсеткіштеріне сәйкес деп қабылданады. Бұл жағдайда оңтайландыруға жататындары – АҚ-ың геометриялық параметрлері: статордың ішкі диаметрі D , статордың ішкі бөлігінің ұзындығы l , орам қадамы Y және β параметрі. [2]-де келтірілген.

[2,3] - тен, берілген қуатта, айналу жиілігінде және таңдалған электромагниттік жүктемелер мәндерінде өзекшенің көлемі тұрақты болатыны және машинаның негізгі өлшемдерімен анықталатыны белгілі:

$$D^2 l = const . \quad (1)$$

β параметрі машинаның диаметрінің оның ұзындығына қатынасымен және полюстік бөлік арқылы анықталады, яғни

$$\beta = \frac{\tau}{l},$$

мұнда: $\tau = \frac{\pi D}{2p}$ - полюстік бөліктің ұзындығы; p – АҚ жұпталған полюстерінің саны.

[2]-де статор орамасындағы шығындарды барынша азайтатын ортадан тепкіш сорғының АҚ-ның геометриялық параметрлерін анықтау міндеті қойылған, бұл ретте өзекше көлемі D^2l және таңдалған электромагниттік жүктемелердің мәндері өзгеріссіз қалады. Көптеген нұсқаларды қолданып есептеу нәтижесінде статордағы қуат шығындарының ΔP_l орам қадамы Y -ке тәуелділігі алынды, мұнда параметр β мәндері тұрақты деп қабылданды. Одан әрі кезекпен $\beta_{\text{оңт}}$ және $Y_{\text{оңт}}$ оңтайлы мәндері анықталды.

[2] шығын қуатын анықтау үшін алынған өрнектерді аздап түрлендіріп келесідей түрде жазуға болады:

$$P_1(Y) = \frac{1}{\sin^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot Y\right)} \cdot \frac{(1+\beta \cdot K_{л1} \cdot Y)}{(1+\beta \cdot K_{л1})} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt[3]{\beta}} + K_{л1} \cdot Y \cdot \sqrt[3]{\beta^2} \right], \quad (2)$$

бұл β тұрақты болған кезде Y өзгертіп статор орамасындағы электрлік шығын қуатының минимал мәнін анықтау үшін алынған өрнек,

$$P_2(\beta) = \frac{1}{\sin^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot Y\right)} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\beta^2}} + \sqrt[3]{\beta} \cdot K_{л1} \cdot Y \right) + M_{21} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\beta^2}} + K_{л2} \cdot \sqrt[3]{\beta} \right), \quad (3)$$

бұл Y тұрақты болған кезде β өзгертіп қозғалтқыштағы шығынды азайту үшін қозғалтқыштың тиімді өлшемін анықтауға арналған өрнек.

Қозғалтқыштың шығынын азайту үшін осы өрнектердің параметрлері β және Y бойынша минимал мәндерін табу керек. Ол үшін «Mathcad» бағдарламасының көмегімен функцияның минимумын іздейміз. (2) – ші өрнектегі орама қадамының Y оңтайлы мәнін орамадағы ЭҚК 5-ші және 7-ші гармоникалардың амплитудасын азайту үшін $0,8 \div 0,85$ аралығынан алады. Ал 3-ші гармониканы және оған еселі болатын жоғары гармоникаларды статор орамасын жұлдызша жалғау арқылы жояды. Сондықтан біз зерттеуді 3-ші өрнек үшін жүргіземіз. Бұл өрнекте Y пен β тәуелді болатындықтан осы екі шамаға қатысты функцияның минимумын анықтау үшін өрнекті келесі түрде жазамыз, яғни екі параметрге де тәуелді функция ретінде

$$P(\beta, Y) = \frac{1}{\sin^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot Y\right)} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\beta^2}} + \sqrt[3]{\beta} \cdot K_{л1} \cdot Y \right) + M_{21} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\beta^2}} + K_{л2} \cdot \sqrt[3]{\beta} \right), \quad (4)$$

Бұл функцияны, мысал ретінде қуаты 15 кВт және полюстер саны $2p=2$ тең болатын қысқаша тұйықталған роторлы асинхронды қозғалтқыштың минимал шығынына сәйкес келетін Y және β мәндерін анықтау үшін пайдаланамыз. Функцияның минимумын «Mathcad» бағдарламасы бойынша анықтау нәтижесі келесідей болды:

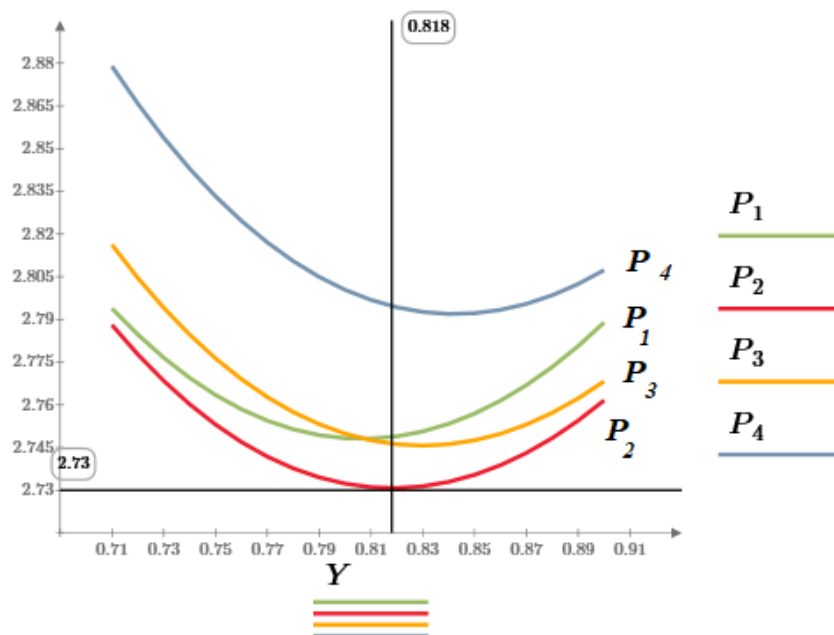
$$\beta := 0.5 \quad Y := 0.1$$

$$\text{minimize}(P, \beta, Y) = \begin{bmatrix} 3.126 \\ 0.818 \end{bmatrix}$$

Бұл параметрлер үшін, яғни $\beta=3.126$ және $Y=0.818$ болған кездегі қозғалтқыштың минимал шығыны келесідей болады

$$P(3.126, 0.818) = 2.731.$$

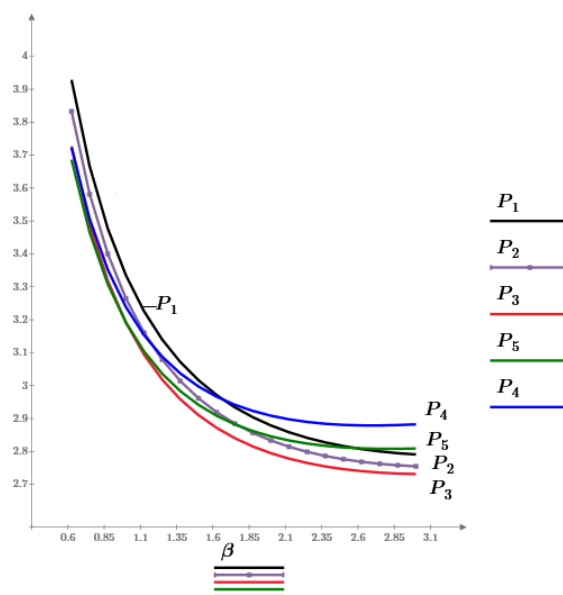
Енді (4) өрнекті β әртүрлі тұрақты мәні үшін орама қадамын Y өзгертіп функцияның орама қадамына тәуелді болатын бірнеше графиктер аламыз.



1 сурет – Функцияның β әртүрлі тұрақты кезіндегі Y тәуелділік графиктері

Бұл графикте $\beta = 4$ сәйкес келетін қуат шығыны P_1 , $\beta = 3.126$ сәйкес P_2 , ал $\beta = 2.5$ және $\beta = 2$ сәйкес келетін қуат шығындары P_3 және P_4 . Бұл график $\beta = 3.126$ және $Y=0.818$ тең болған кезде қуат шығынының $P_2 = 2.73$ ең аз мәнге ие болатынын, ал β басқа мәндері үшін шығынның өсетінін айқын көрсетеді.

Әрі қарай бұл функцияны Y әртүрлі тұрақты мәні кезінде β өзгертіп функцияның β тәуелділік графигін аламыз.



2 сурет – (4) өрнектегі функцияның Y тұрақты әртүрлі мәндері кезіндегі β тәуелділік графигі

Бұл графиктерден де асинхронды қозғалтқыштың шығын қуатының орама қадамы $Y = 0.818$ тең, ал $\beta = 3.126$ болған кезде ең аз мәнге ие болатынын көреміз.

Қортынды. (4) өрнекті зерттеу нәтижесінде асинхронды қозғалтқыштағы электр шығынын азайту үшін оларды жобалау барысында осы функцияның минимум мәніне сәйкес Y орама қадамы мен полюстік бөліктің қозғалтқыштың статорның ұзындығына қатынасы бойынша анықталатын β шамаларын анықтау керек болатынын көреміз.

Ортадан тепкіш сорғылардың электржетегінің энергетикалық көрсеткіштерін арттыру – электржетек жүйесін таңдауды, басқару алгоритмдерін әзірлеуді және басқа да мәселелерді қамтитын көпфакторлы міндет болып табылады. Осы жұмыстың нәтижелері қозғалтқыштағы шығындарды оның геометриялық қатынастарын оңтайландыру арқылы азайту міндетін шешудің ұсынылып отырған тәсілінің негізділігін көрсетеді.

Әдебиеттер тізімі

1. Новокшенов В.С., Сембин Д.Е. Энергосберегающий асинхронный двигатель привода насоса. Сб. «Энергетика и топливные ресурсы Казахстана», №2, Алматы:2020.
2. Сембин Д.Е. Оптимизация геометрии статора энергосберегающего асинхронного двигателя частотно – регулируемого привода насоса нефтеперекачивающей станции. Сб. научных трудов по материалам второй международной научно – технической конференции АИЭС, Алматы: 2015.
3. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. – М.; Юрайт, 2021.
4. М. А. Мустафин, Д. Е. Сембин. Электропривод насосных агрегатов нефтеперекачивающих установок. – Алматы, 2023

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Таштенов А.Н, Ауталипов Д.Н.

Алматинский Университет Энергетики и Связи им. Г. Даякеева, Казахстан

*e-mail: Ta.arman@aes.kz; Au.dinmuhamed@aes.kz

Введение

Рост потребления электроэнергии в современных энергосистемах предъявляет всё более высокие требования к пропускной способности линий электропередачи и к качеству передаваемой мощности. В условиях ускоренного развития промышленных центров и городов Казахстана наблюдается дефицит электроэнергии, особенно в южных и западных регионах страны, что делает проблему эффективного использования существующих сетей крайне актуальной.

Традиционное решение заключается в строительстве новых линий, однако это связано с большими капитальными затратами, длительными сроками и экологическими рисками. Поэтому особое внимание уделяется альтернативным методам повышения пропускной способности и надёжности существующих линий. Одним из таких решений является использование современных проводов с улучшенными характеристиками — термостойких, высокопрочных и коррозионностойких. Применение таких проводов, как АСк2у или Aero-Z, позволяет уменьшить провисание, повысить механическую прочность и снизить электрические потери. В результате возможно увеличение пропускной способности в 2–3 раза без замены опор и масштабной реконструкции ЛЭП.

Однако повышение пропускной способности только за счёт проводников не решает всех проблем энергосистемы. Существенным ограничивающим фактором остаётся реактивная мощность, которая приводит к дополнительным потерям, падению напряжения и снижению коэффициента мощности. Для борьбы с этим широко применяются устройства компенсации реактивной мощности. Среди них особое место занимает статический тиристорный компенсатор (СТК), позволяющий динамически регулировать режим работы сети. СТК обеспечивает стабилизацию напряжения, снижение гармонических искажений, повышение коэффициента мощности и снижение активных потерь, что в конечном итоге повышает эффективность передачи электроэнергии.

Таким образом, интеграция двух подходов — применение современных проводов и использование устройств компенсации реактивной мощности — позволяет комплексно повысить пропускную способность электрических сетей. Первый подход обеспечивает физическую возможность передачи больших токов при минимальных потерях, а второй — улучшает режимные параметры сети, стабилизирует её работу и снижает нагрузку на оборудование. Совместное

использование этих решений формирует основу для создания более надёжной, энергоэффективной и экономически устойчивой энергосистемы.

Цели и задачи исследования

Цель исследования – разработка и анализ методов повышения пропускной способности электрических сетей за счёт применения современных проводов с улучшенными эксплуатационными характеристиками и внедрения устройств компенсации реактивной мощности, в частности статических тиристорных компенсаторов (СТК).

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Изучить существующие подходы к увеличению пропускной способности линий электропередачи и выявить их преимущества и ограничения.
2. Рассмотреть особенности применения современных проводов (термостойких, высокопрочных, компактных типов) и оценить их влияние на снижение электрических потерь, провисание и повышение надёжности работы ЛЭП.
3. Провести анализ работы устройств компенсации реактивной мощности, уделяя особое внимание статическим тиристорным компенсаторам, их структуре, принципам действия и функциональным возможностям.
4. Исследовать синергетический эффект от совместного применения современных проводов и СТК для повышения пропускной способности и устойчивости энергосистемы.
5. Разработать модель для сравнительного анализа режимов работы электрической сети с традиционными проводами и без компенсации реактивной мощности, а также с использованием усовершенствованных проводов и СТК.
6. Провести расчётные эксперименты и сопоставить полученные результаты с действующими стандартами и практикой эксплуатации электрических сетей.

Методология исследования

Методологической основой исследования является комплексный подход, сочетающий теоретический анализ, математическое моделирование и сравнительный эксперимент. Такой подход позволяет оценить эффективность применения современных проводов и статических тиристорных компенсаторов (СТК) как по отдельности, так и в совокупности.

1. Объект исследования

В качестве объекта исследования рассматривается упрощённая модель электрической энергосистемы, включающая генераторные источники, нагрузочные узлы и линии электропередачи. Модель создаётся с учётом реальных параметров сетей среднего и высокого напряжения, эксплуатируемых в энергосистеме Казахстана.

2. Используемые материалы и технические решения

Современные провода нового поколения (АСк2у, Aero-Z и др.), отличающиеся высокой термостойкостью, механической прочностью и

сниженным электрическим сопротивлением. Их применение позволяет увеличить допустимые токовые нагрузки, снизить провисание и уменьшить тепловые потери

Устройство компенсации реактивной мощности — статический тиристорный компенсатор. СТК функционирует как регулируемая шунтирующая установка, поддерживая оптимальный баланс активной и реактивной мощности, стабилизируя напряжение и снижая потери в линии.

3. Методы моделирования и расчёта

Расчёт электрических режимов сети выполняется методом **Ньютона–Рафсона**, что позволяет определить распределение потоков мощности, потери активной энергии и уровни напряжений в узлах при различных сценариях.

Для оценки влияния температурных и нагрузочных факторов на параметры линии моделируются режимы при изменении температуры окружающей среды и уровня передаваемой мощности.

В работе проводится сравнение режимов:

1. с традиционными проводами без компенсации реактивной мощности;
2. с использованием современных проводов;
3. при подключении СТК;
4. при одновременном применении современных проводов и СТК.

4. Инструменты исследования

Для анализа режимов работы используется специализированное программное обеспечение для моделирования электрических систем (например, RastrWin3, MATLAB/Simulink), позволяющее выполнять вариационные расчёты, строить характеристики и визуализировать результаты.

5. Критерии оценки эффективности

- снижение активных потерь в линии;
- повышение пропускной способности;
- стабилизация напряжения в нагрузочных узлах;
- улучшение коэффициента мощности;
- рост экономической эффективности эксплуатации.

Результаты и обсуждение

Проведённые расчёты и анализ показали, что как использование современных проводов, так и внедрение устройств компенсации реактивной мощности (СТК) позволяют значительно повысить пропускную способность электрических сетей.

1. Влияние современных проводов

Использование проводов нового поколения (АСк2у, Aero-Z) обеспечивает уменьшение удельного электрического сопротивления на 2–10%, снижение провисания и повышение механической прочности сердечника

В результате:

- активные потери энергии снижаются в среднем на 5–15%;
- увеличивается допустимая токовая нагрузка без замены опорных конструкций;
- уменьшается влияние климатических факторов (обледенение, сильный ветер).

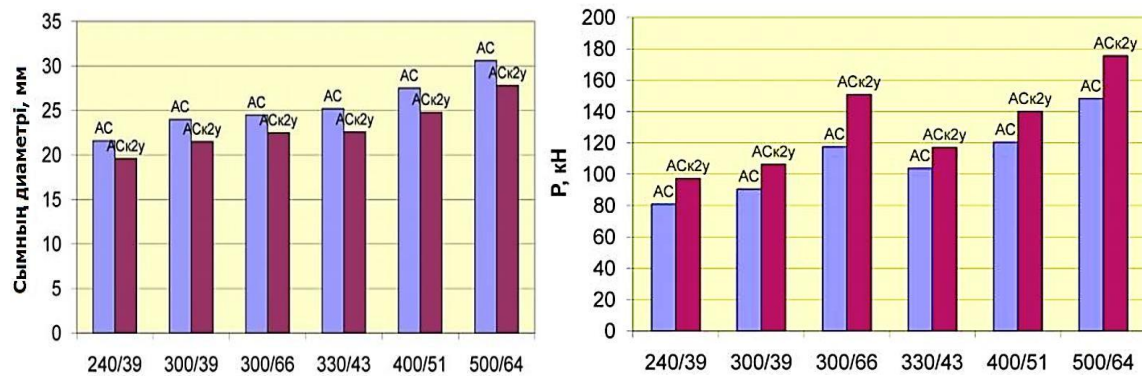


Рисунок 1 - Сравнение диаметров и механической устойчивости проводов AC и ACk2y

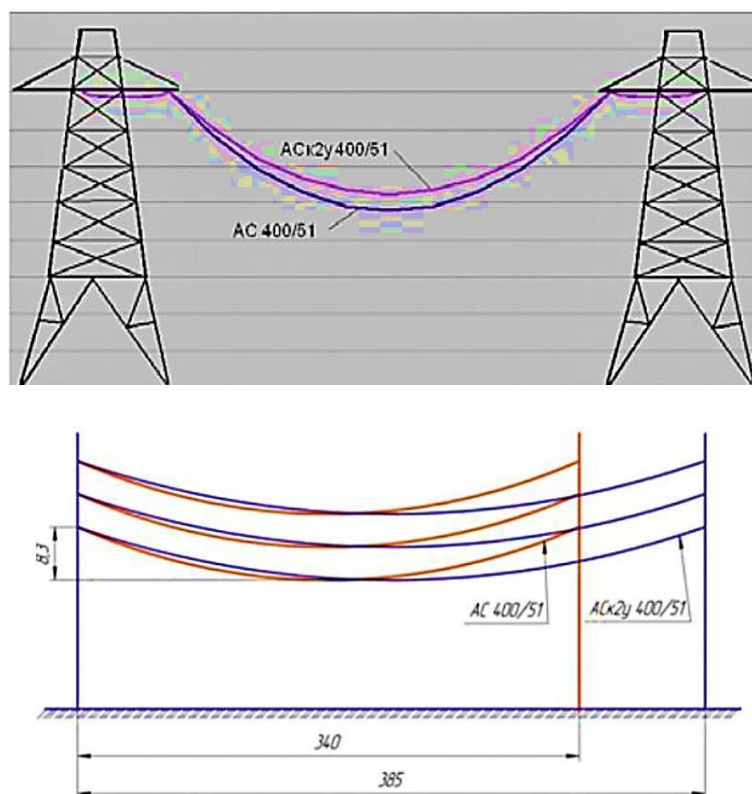


Рисунок 2 - Проявление провисания традиционных проводов и проводов ACk2y

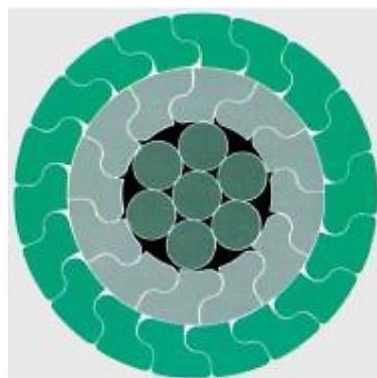


Рисунок 3 - Конструкция провода Aero-Z

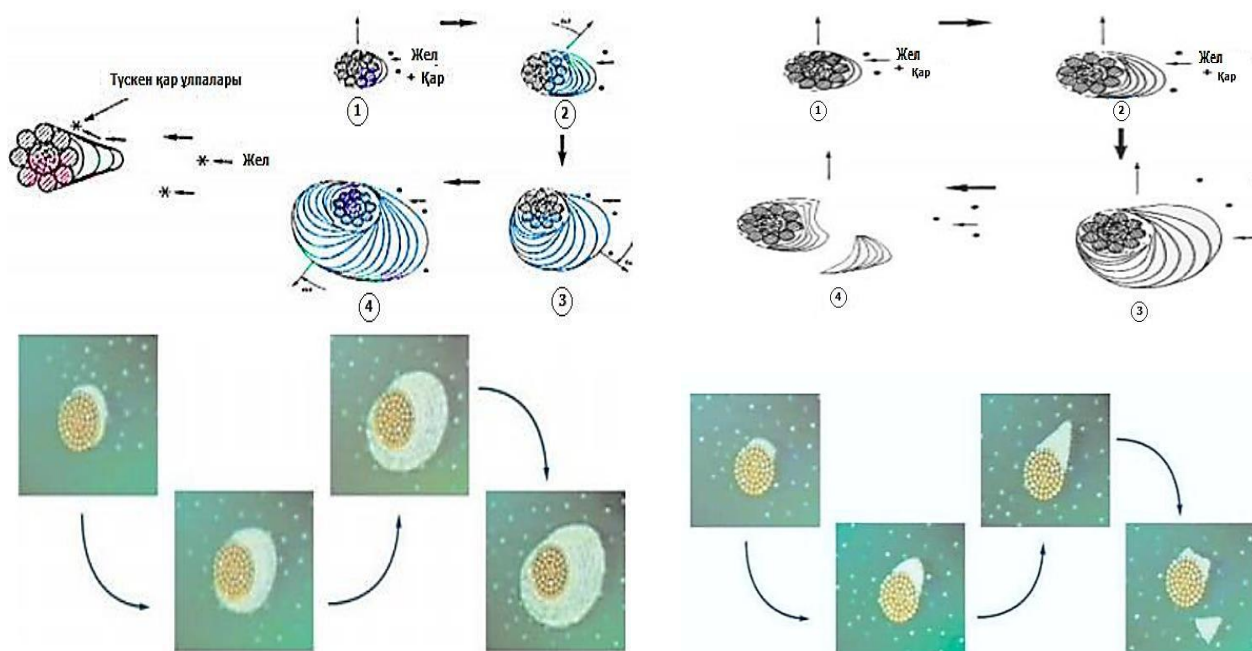


Рисунок 4 – Схема прилипания снега: Слева – обычный провод, справа – Aero-Z

Таким образом, модернизация проводов позволяет увеличить передаваемую мощность в 2–3 раза при сохранении существующей инфраструктуры, что особенно важно для регионов с высоким ростом нагрузки.

2. Влияние статического тиристорного компенсатора

СТК, будучи гибким устройством управления реактивной мощностью, продемонстрировал высокую эффективность в следующих аспектах:

- повышение коэффициента мощности до 0,95–0,98;
- снижение падения напряжения в нагрузочных узлах;
- уменьшение токов в линии и связанных с ними потерь активной энергии;
- компенсация высших гармоник и выравнивание нагрузок.

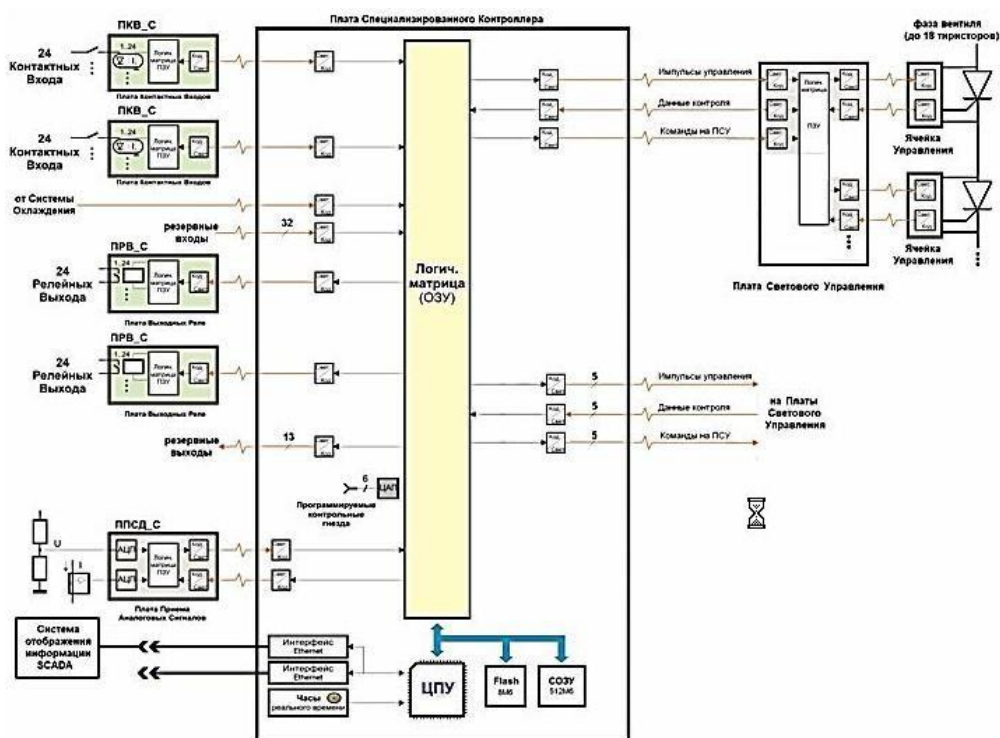


Рисунок 5 – Функциональная схема СТК

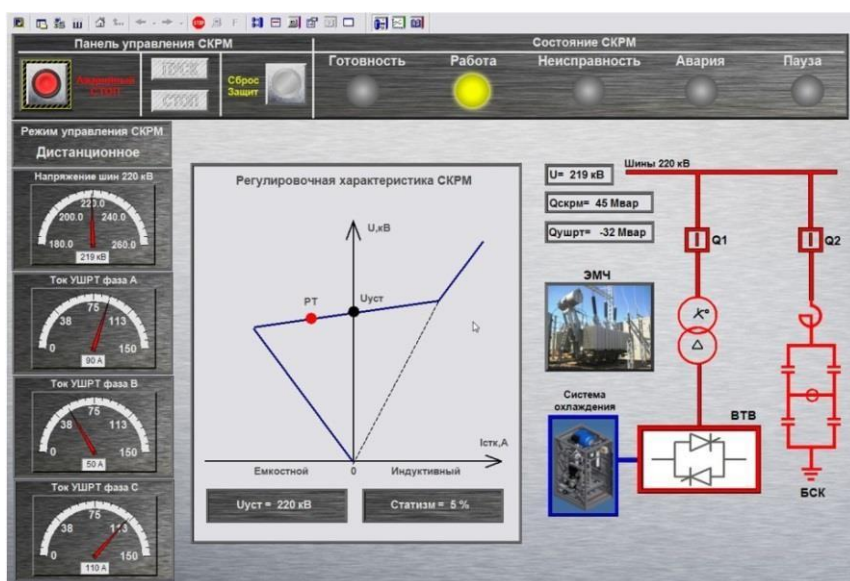


Рисунок 6 – SCADA-интерфейс

Моделирование показало, что при включении СТК общие потери в системе могут быть снижены на 10–20%, а напряжение на шинах потребителей стабилизируется в пределах нормативных значений.

3. Совместное применение технологий

Наиболее высокий эффект достигается при комплексном использовании двух подходов:

- современные провода обеспечивают физическую возможность передачи больших мощностей с минимальными потерями;

- СТК обеспечивает режимную устойчивость, снижая реактивные потоки и поддерживая оптимальное качество электроэнергии.

В совокупности эти меры позволяют:

- увеличить пропускную способность ЛЭП до 2,5–3 раз;
- сократить активные потери до 20%;
- обеспечить стабильное напряжение и повысить надёжность энергосистемы;
- снизить эксплуатационные затраты и продлить срок службы оборудования.

Заключение

Проведённое исследование подтвердило, что повышение пропускной способности электрических сетей требует комплексного подхода, объединяющего как совершенствование физических параметров линий, так и оптимизацию режимных характеристик энергосистемы.

Во-первых, использование современных проводов нового поколения (АСк2у, Aero-Z и др.) обеспечивает снижение активного сопротивления, уменьшение провисания и повышение механической прочности. Это позволяет увеличить допустимую токовую нагрузку в 2–3 раза без строительства новых ЛЭП и снизить эксплуатационные затраты.

Во-вторых, внедрение устройств компенсации реактивной мощности, в частности статических тиристорных компенсаторов (СТК), позволяет существенно улучшить режимные параметры: повысить коэффициент мощности, стабилизировать напряжение, уменьшить токи и активные потери, а также снизить гармонические искажения.

Наибольший эффект достигается при совместном применении современных проводов и СТК. Такой подход обеспечивает:

- сокращение активных потерь до 30–35% по сравнению с базовым сценарием;
- увеличение пропускной способности линии в несколько раз;
- повышение устойчивости и надёжности работы энергосистемы в условиях возрастающих нагрузок;
- улучшение экономической и энергетической эффективности эксплуатации сетей.

Таким образом, интеграция инженерных и режимных решений позволяет создать более устойчивую, энергоэффективную и экологичную электрическую сеть, отвечающую современным требованиям энергоснабжения.

Список литературы

1. Щеглов Н.В. «Современные подходы к совершенствованию и развитию воздушных линий электропередачи». Четвертая Российская научно-практическая конференция с международным участием.
2. «Алюминиевый композитный усиленный провод». Энерго-эксперт №3, 2007 10. Брошюра фирмы «3М» ACCR 2012.

3. Белый Д.И. «Алюминиевые сплавы для токопроводящих жил кабельных изделий». Наука и Техника, №1 (232) 2012.
4. <http://95.154.104.206/index.php?dir=Library/%CB%E5%EA%F6%E8%8>
5. <http://lib.convdocs.org/docs/index-140669.html?page=3>
6. <http://www.ruscable.ru/print.html?p=/article/Innovacionnye>
7. Неизолированные провода для воздушных линий электропередачи Nexans Aero-Z. – <http://www.kabtrade.ru>
8. Глобальный эксперт в кабельных системах Nexans – <http://www.nexans.ru/eservice>
9. Инновационные конструкции неизолированных проводов – <http://www.uncomtech.ru>
10. Бортник И.М., Буряк С.Ф., Олышванг М.В., Таратута И.П. Статические тиристорные компенсаторы для энергосистем и сетей электроснабжения. М.: Электричество, 2012.

UDC 621.327.4:536.2

THERMAL MANAGEMENT OF LIGHTING DEVICES AND ITS TYPES

Rakhmonov I.U., Toirov M.T.

Tashkent state technical university named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan

*e-mail: muhammadxon.toirov@gmail.com

1 Main text

In these days, the demand for LED-type lighting devices is increasing proportionally with the growth of the population. The reason is that they operate for a long time and meet environmental requirements. However, this does not mean that such lighting devices have no disadvantages. During operation, these devices generate heat, which leads to a reduction in both the overall efficiency and the service life of the lighting device. This thesis examines the main types of thermal management technologies, their advantages and disadvantages, as well as modern solutions. Improper thermal management in lighting devices can lead to a decrease in LED brightness, accelerated wear of components, and even complete failure of the device. This directly necessitates thermal management. The main task of thermal management systems is to effectively dissipate excess heat and prevent the overheating of device components. Properly designed thermal management approaches not only maintain the operational efficiency of the device but also significantly extend its service life. This thesis examines the main types of thermal management technologies, their advantages and disadvantages, as well as modern solutions [1,2]. There are four types of thermal management systems: passive, active, electronic, and combined methods.

Table 1. Types of thermal management systems.

Type	Advantages	Disadvantages	Method	Applica-tion Area
Passive	No energy consumption, simple, reliable	Requires large size, insufficient for high power	Heat sink (aluminum, copper)	Small projectors, LED lamps
	Cheap, convenient	Poor air circulation	Natural convection	Open-type lamps
	Improves thermal conductivity	Loses quality over time	Thermal paste	LED modules, chips
Active	Fast heat dissipation	Additional energy consumption, noise	Fan	High-power luminaires, LED projectors
	High accuracy in temperature control	Expensive	Peltier module (TEC)	Optical devices
	Excellent efficiency	Expensive and complex	Liquid cooling	Specialized high-power LED systems
Combin ed	High efficiency	Requires complex additional maintenance	Fan + Heat sink	Industrial lamps, stadium projectors
Electro nic	Protection from overheating, real-time monitoring	Requires additional electronics	Sensor-based control	Smart LED lamps
	Increases efficiency	Complex control algorithm	Voltage regulation	LED systems
	Longer lifespan	Reduced luminous flux	Automatic current limiting	Energy-efficient LED systems

Passive cooling technologies include heat sinks, thermally conductive materials, and optimal design solutions for their placement. The schematic of the passive cooling system is presented below

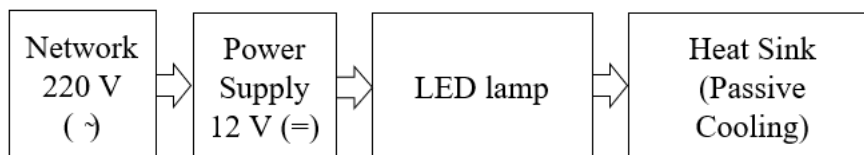


Fig 1. – Schematic of the passive cooling system in the thermal management of a lighting device

In Figure 1, the schematic diagram of the thermal management system of a lighting device connected to the 220 V mains is presented. In this system, the 220 V alternating voltage of the mains is converted into 12 V direct current by a converter, which supplies the required voltage to the LED lamp. Radiators are used in the structure of the lamp for cooling purposes. In particular, aluminum radiators are widely used, since they effectively dissipate heat through convection and radiation. This process is directly called passive cooling. The passive cooling system is considered a relatively simple and low-cost scheme. However, it provides lower reliability. [3]

The thermal management system of a lighting device with active cooling is also considered reliable. The reason is that the number of devices used in this system is greater, and in terms of cost, it is more expensive. In Figure 2, the schematic diagram of the thermal management system with active cooling of the lighting device is shown. In this case, the alternating voltage taken from the 220 V mains is supplied to the power supply device of the lighting equipment, which converts 220 V into 12 V direct voltage. From there, it goes to the temperature sensor, which directly provides information about the temperature, and then to the microcontroller, which is one of the main control units of the process. In the next stage, the voltage value from the microcontroller is connected in parallel directly with the lamps. After that, it goes to the cooling system's final stage via the fan. Active cooling systems include fans, air circulation systems designed for heat exchange, as well as thermoelectric (Peltier) modules. These systems provide efficient cooling under high thermal loads. Modern lighting devices are often equipped with temperature sensors. This allows smart control systems to automatically adjust the operating mode according to the LED temperature.

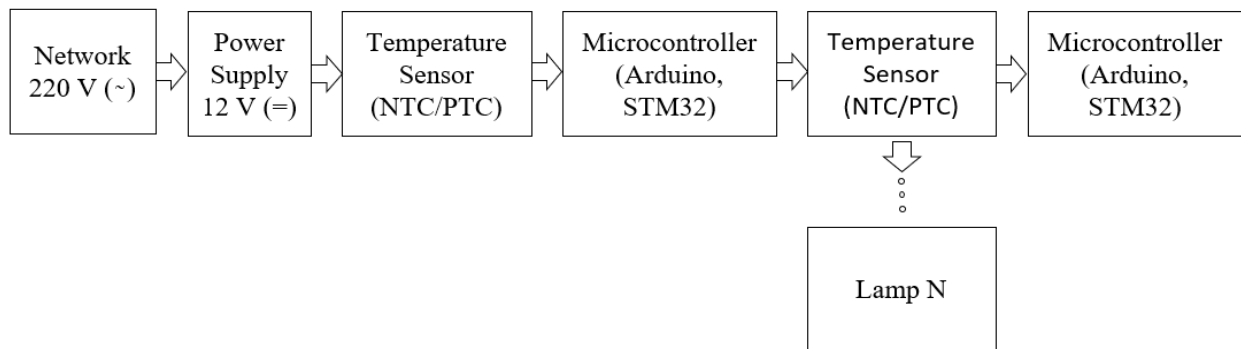


Fig 2. - Schematic diagram of the active cooling system in the thermal management of a lighting device

Such an approach not only manages heat but also improves energy efficiency. At present, the field of modeling is considered one of the modern solutions to this problem. In particular, the process of heat dissipation modeling is a critical stage for ensuring the more efficient operation of LED-based lamps. To effectively manage the heat generated in LED lighting device chips, Fourier's heat conduction equations are widely applied. These equations make it possible to determine temperature distribution and heat flux. In thermal modeling, the most commonly used software environments are ANSYS and COMSOL Multiphysics. The ANSYS environment is based on the Finite

Element Analysis (FEA) methodology and is applied to determine heat distribution in LED packages and heat sinks. Based on the results, it is possible to optimize parameters of convection, radiation, and heat conduction. Meanwhile, multiparadigm modeling environments provide the ability to simultaneously analyze thermal, electrical, and mechanical stresses, which in turn helps optimize the design by simulating real operating conditions of LED modules [4].

Fourier's equation in a three-dimensional steady-state form is expressed as:

$$kT + q = 0$$

where: k – thermal conductivity coefficient, T – temperature, q – internal heat source, the power converted from electricity to heat in the LED.

According to experiments conducted by several researchers, LED modules equipped with different heat sinks were tested. Temperature was measured using thermocouples and infrared cameras. The results showed that as the temperature increased, luminous efficiency decreased. This confirms the necessity of improving the effectiveness of thermal management systems. Thermal performance can be enhanced by modifying the geometry of the heat sink, employing new materials with higher thermal conductivity, and implementing intelligent control algorithms. Control systems based on PID and fuzzy logic can monitor temperature in real time and adjust lighting intensity accordingly [5,6].

List of references

1. Ministry of Energy of the Republic of Uzbekistan. (2022). Technical guidelines on the efficiency of using LED lighting devices. Technical report.
2. Hamidov, M. A. (2021). Energy saving and thermal management issues in lighting systems. Scientific Bulletin of the National University of Uzbekistan, 2(3), 45–51.
3. Baniya, B., & Lee, J. (2020). Thermal management in solid-state lighting: A review of the state-of-the-art and future directions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 133, 110261.
4. ANSYS Inc. (2022). Thermal Simulation of LED Lighting Devices. White Paper.
5. COMSOL Inc. (2023). Modeling Thermal Management in LED Lighting Modules. Application Gallery.
6. Lasance, C. J. M. (2008). Thermal management of LED-based systems: Some recent developments. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 92(1), 1–8.

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ РОСТА ДОЛИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Тоиров М.Т.*, Ниёзов Н.Н.

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

* e-mail: muhammadxon.toirov@gmail.com

1 Введение

В период с 2015 по 2023 годы мировое потребление первичной энергии увеличилось примерно на 13,6%, что свидетельствует о продолжающемся росте глобального спроса на энергоресурсы. Несмотря на временное сокращение потребления в 2020 году, вызванное пандемией COVID-19 и связанным с ней спадом экономической активности, в последующие годы наблюдалось устойчивое восстановление мировой экономики. Уже к 2023 году общий уровень потребления энергии вырос на 2% по сравнению с 2022 годом [1]. Такая динамика отражает не только рост производственных мощностей и транспортного сектора, но и общее увеличение потребностей населения вследствие урбанизации и роста численности мирового населения.

Учитывая постоянный прирост энергопотребления и ограниченность запасов традиционных (ископаемых) энергоресурсов, особую актуальность приобретает развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Согласно статистике, в 2023 году доля ВИЭ в мировом энергобалансе составляла около 13%, но, по прогнозам, к 2030 году этот показатель достигнет 20%, что подтверждает глобальную тенденцию перехода к «зелёной» энергетике. Основными драйверами такого роста являются государственная поддержка в рамках климатических соглашений (например, Парижское соглашение), снижение себестоимости технологий солнечной и ветровой генерации, а также необходимость сокращения выбросов парниковых газов.

Узбекистан, обладая значительным природным потенциалом в области возобновляемой энергетики, также активно движется в направлении энергоперехода. Географическое расположение страны обеспечивает благоприятные условия для развития как солнечной, так и ветровой энергетики:

среднегодовое количество солнечных часов превышает 3000 часов, что делает солнечную генерацию одной из наиболее перспективных сфер;

определённые регионы (например, Навоийская, Бухарская и Каракалпакская области) характеризуются устойчивыми ветровыми потоками, что создаёт основу для строительства крупных ветропарков.

Согласно прогнозам и стратегическим документам, к 2030 году доля возобновляемых источников в общем энергобалансе Узбекистана может

достичь 54%, что значительно превышает средние мировые показатели. При этом ключевую роль будут играть именно солнечные и ветровые электростанции, доля которых к этому сроку должна составить порядка 45% от общей установленной мощности страны (см. Рис. 1). Это означает, что уже к концу текущего десятилетия именно ВИЭ станут основным источником прироста электроэнергии в Узбекистане, постепенно вытесняя традиционные углеводородные ресурсы.

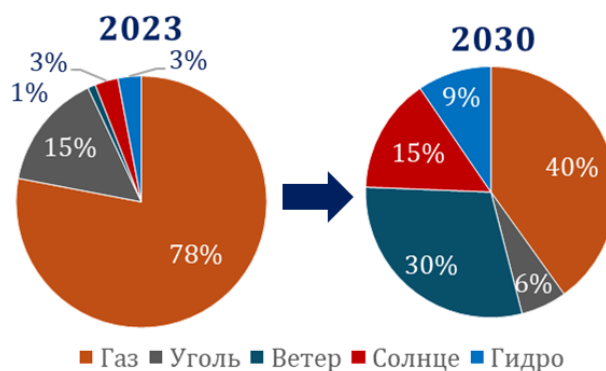


Рис. 1. – Сравнительный анализ энергетического баланса Узбекистана за 2023–2030 годы

В электрических сетях, к которым подключены крупномасштабные возобновляемые источники энергии (ВИЭ), математическое моделирование динамических характеристик системы является одним из ключевых научных инструментов для обеспечения её устойчивости. Такие нестабильные источники, как солнечная и ветровая энергия, вызывают колебания частоты и напряжения, что угрожает надёжной работе сети. С помощью математических моделей можно количественно описать влияние этих изменений во времени, предсказать потери инерции, снижение частоты или резкие отклонения напряжения.

1 Основной текст

В рамках анализа динамических характеристик электрических сетей с высокой долей крупномасштабных возобновляемых источников энергии (ВИЭ) ключевую роль играют математические модели, позволяющие описывать поведение системы в переходных режимах и при возмущениях. Среди них выделяются четыре фундаментальные модели:

1. Уравнение динамики частоты.

Используется для описания вращательной динамики синхронных генераторов и связывает механическую мощность турбины, электромагнитную мощность генератора и изменение угловой скорости ротора. В классическом виде уравнение отражает баланс моментов инерции и приложенных мощностей.

2. Модель переходной устойчивости напряжения (transient voltage stability).

Позволяет оценить устойчивость работы системы при кратковременных возмущениях (короткие замыкания, резкое отключение нагрузки, колебания

генерации ВИЭ). Модель учитывает динамику обмоток возбуждения, реактивные потоки мощности и способность системы сохранять допустимый уровень напряжения после возмущения. [1,2]

3. Выражение, отражающее влияние инерции на частотные колебания.

В традиционных энергосистемах роль демпфера выполняют синхронные генераторы, обладающие большой механической инерцией. В сетях с высоким проникновением ВИЭ инерция снижается, что приводит к увеличению амплитуды и скорости колебаний частоты. Для моделирования используются модифицированные уравнения swing equation с учётом «виртуальной инерции» инверторных установок.

4. Модель переходных процессов (transient response).

Описывает реакцию энергосистемы на резкие изменения генерации или нагрузки, включая форму отклонений частоты и напряжения, их амплитуду и время восстановления до устойчивого состояния. На базе этой модели возможно оценить устойчивость энергосистемы при росте доли непредсказуемых источников генерации (солнечных и ветровых).

Особое внимание уделяется устойчивости частоты, так как именно этот параметр наиболее чувствителен к изменению структуры генерации. В традиционных энергосистемах тепловые электростанции (ТЭС), работающие на газе или пару, благодаря массивным вращающимся частям обладают высокой механической инерцией, которая сглаживает кратковременные дисбалансы и поддерживает стабильность частоты [3, 4].

Однако в системах с высокой долей ВИЭ (солнечные и ветровые электростанции) ситуация принципиально иная:

- солнечные панели и ветротурбины через инверторы практически не обеспечивают инерционного отклика;
- даже незначительные отклонения между генерацией и потреблением мгновенно приводят к резким колебаниям частоты;
- при отсутствии компенсирующих механизмов это создаёт риск каскадных отключений, ухудшения качества электроэнергии и снижения надёжности энергосистемы [5,6].

В связи с этим одним из приоритетных направлений современных исследований является разработка методов виртуальной инерции (virtual inertia), реализуемых в инверторных системах управления. Такие решения позволяют компенсировать дефицит механической инерции в сетях с высокой долей ВИЭ, обеспечивая демпфирование частотных колебаний и повышение устойчивости энергосистемы.

Этот процесс описывается следующим уравнением:

$$\frac{df(t)}{dt} = \frac{1}{2H} \cdot \frac{P_m(t) - P_e(t)}{f_0}$$

где H — постоянная инерции системы, P_m и P_e — соответственно мощность генерации и нагрузки, f_0 — номинальная частота. При низком значении H

система становится чувствительной к частотным колебаниям, что может привести к аварийным ситуациям.

Из-за переменчивой природы солнечной и ветровой генерации значительно возрастают колебания напряжения [7,8]. В случае отключения или нестабильной работы таких установок возможны отклонения напряжения до 5–10%, что особенно критично для низковольтных распределительных сетей (0,4–6 кВ). Временные характеристики напряжения можно описать моделью RC-цепи:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{1}{C} \left(I(t) - \frac{V(t)}{R} \right)$$

где $V(t)$ — напряжение, $I(t)$ — ток, R и C — параметры цепи. Эта модель позволяет оценить поведение напряжения в переходных режимах и восстановление после отклонений.

Энергетические системы с ВИЭ должны быстро реагировать на внезапные изменения нагрузки или аварийные режимы. Такие кратковременные изменения называются переходными процессами и могут длиться от долей миллисекунды до нескольких секунд. Их поведение описывается дифференциальным уравнением первого порядка:

$$T \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = Ku(t)$$

где T — постоянная времени, K — коэффициент усиления, $u(t)$ — входной сигнал (например, изменение нагрузки), $x(t)$ — отклик системы (напряжение или частота). Это уравнение служит основой для анализа скорости и устойчивости отклика системы.

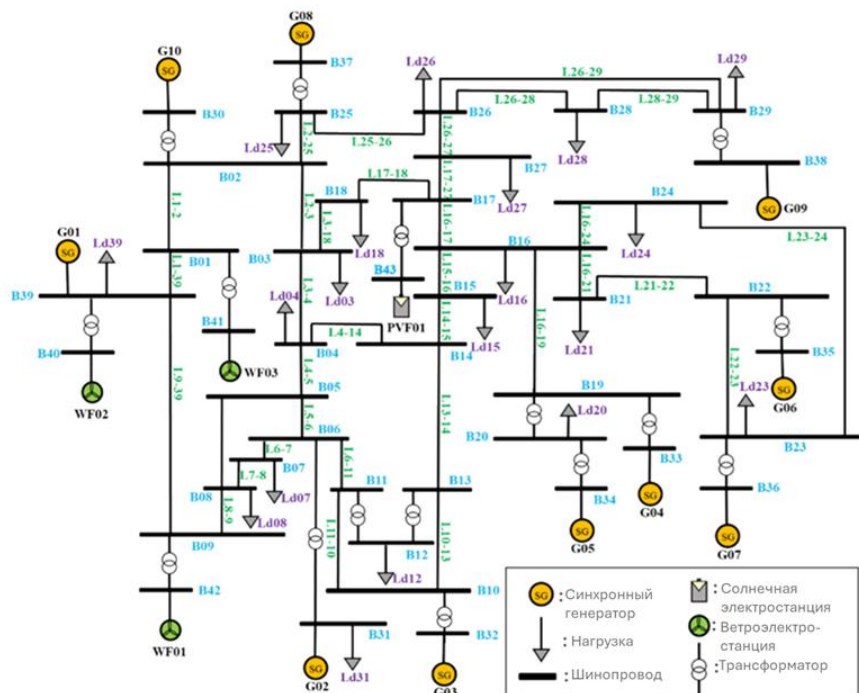


Рис.2. – Модифицированная модель системы передачи IEEE с 39 шинами

При внезапном изменении нагрузки или генерации в системе, доля которой обеспечивается ВИЭ, возникает необходимость в быстрой стабилизации частоты. Так как ВИЭ не обладают механической инерцией, компенсировать отклонения становится сложнее. Величину отклонения частоты можно оценить с помощью следующего приближённого выражения:

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{2Hf_0}$$

где Δf — изменение частоты (Гц), ΔP — разность между генерацией и нагрузкой (МВт), H — постоянная инерции, f_0 — номинальная частота (обычно 50 Гц). При уменьшении H даже небольшие отклонения мощности могут вызывать значительные частотные колебания, что увеличивает риск отключения чувствительного оборудования и нестабильности в энергосистеме.

Для построения и валидации модели LSTM были использованы данные, полученные на основе симуляции тестовой системы IEEE 39-bus New England, которая признана международным сообществом и широко применяется для изучения влияния возобновляемых источников энергии на устойчивость энергосистем (Рис. 2). В процессе симуляции учитывались нестабильная генерация солнечных и ветровых электростанций, колебания нагрузки, снижение частоты и переходные процессы. В общей сложности было собрано 500 временных отсчётов. Для каждой временной точки учитывались следующие входные параметры:

- нагрузка системы $P_{\text{load}}(t)$
- генерация от солнечных источников $P_{\text{gen}}^{\text{solar}}(t)$
- генерация от ветровых источников $P_{\text{gen}}^{\text{wind}}(t)$
- текущая частота $f(t)$
- напряжение $V(t)$
- значение инерции $H(t)$
- состояние накопителя $SOC(t)$
- скорость ветра $W_{\text{speed}}(t)$

На основе этих данных для модели LSTM была сформирована входная последовательность с окном в 60 временных шагов (`window_size = 60`), предназначенная для обучения модели с целью прогнозирования динамического поведения энергосистемы.

Модель LSTM (Long Short-Term Memory) представляет собой архитектуру глубинного обучения, предназначенную для моделирования динамических изменений во временных рядах, таких как частота $f(t)$, напряжение $V(t)$, инерция $H(t)$ и переходные процессы в электрических сетях. LSTM на каждом временном шаге обновляет внутренние состояния согласно следующим формулам:

$$\begin{aligned} f_t &= \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (\text{врата забывания}) \\ i_t &= \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (\text{входные врата}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{C}_t &= \tanh(W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C) \quad (\text{новое состояние памяти}) \\ C_t &= f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \tilde{C}_t \quad (\text{обновленное состояние памяти}) \\ o_t &= \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (\text{выходные врата}) \\ h_t &= o_t \cdot \tanh(C_t) \quad (\text{выход модели})\end{aligned}$$

где здесь x_t — входной вектор $(P_{\text{load}}, P_{\text{gen}}, H(t), f(t-1), V(t-1))$, h_t — скрытое состояние (прогноз модели), C_t — контекстно-зависимая память во времени. Результаты модели обычно включают предсказанные значения ключевых параметров энергосистемы, таких как изменение частоты $\Delta f = f(t) - f(t-1)$, колебания напряжения ΔV , время восстановления стабильности и градиент $\frac{df}{dt}$. Эти величины особенно важны для сетей с высокой долей возобновляемых источников энергии, где требуется своевременное управление реакцией системы, резервными мощностями и обеспечением надежности.

Проведённое исследование показало, что рост доли возобновляемых источников энергии в мировом и национальном энергобалансе является необратимым и стратегически важным процессом, определяющим будущую устойчивость энергетики. На примере Узбекистана, где к 2030 году прогнозируется достижение более 50% доли ВИЭ, подтверждается глобальная тенденция перехода к «зелёной» энергетике.

Детальный анализ динамических характеристик энергосистемы показал, что переменчивый характер солнечной и ветровой генерации создаёт новые вызовы для стабильности электрических сетей. Отсутствие механической инерции у ВИЭ приводит к более резким и частым колебаниям частоты и напряжения, что особенно критично для низковольтных распределительных сетей. В этих условиях применение классических моделей (уравнение динамики частоты, модели переходной устойчивости и переходных процессов) остаётся основой для оценки устойчивости системы, однако требует адаптации с учётом виртуальной инерции и новых алгоритмов управления инверторами.[8, 9]

Разработанные математические выражения для описания динамики частоты, напряжения и переходных процессов, а также использование методов искусственного интеллекта (архитектуры LSTM) подтвердили свою эффективность для прогнозирования поведения энергосистемы в условиях высокой доли ВИЭ. Такой подход позволяет:

- заранее выявлять критические отклонения частоты и напряжения;
- оценивать динамику переходных процессов;
- формировать оптимальные стратегии управления накопителями энергии и резервными мощностями;
- повышать общую надёжность и устойчивость работы энергосистемы.

Таким образом, интеграция классических методов системного анализа с современными инструментами машинного обучения открывает новые возможности для управления энергосистемами будущего. Реализация подобных решений позволит смягчить негативные эффекты от высокой доли переменной

генерации, обеспечить устойчивое энергоснабжение, снизить эксплуатационные риски и поддержать переход к низкоуглеродной энергетике.

Список литературы

1. Ritchie H., Rosado P., Roser M. Energy Production and Consumption [Электронный ресурс]. Our World in Data. 2020. Доступно по: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>. Ссылка активна на 23 мая 2025 г.
2. Saleem M.I., Saha S., Roy T.K., Ghosh S.K. Assessment and management of frequency stability in low inertia renewable energy rich power grids // IET Generation, Transmission & Distribution. 2024. Early Access. DOI: 10.1049/gtd2.13129.
3. Visser L.R., Schuurmans E.M.B., AlSkaif T.A., Fidler H.A., Van Voorden A.M. Regulation strategies for mitigating voltage fluctuations induced by photovoltaic systems in low-voltage grids // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2022. Vol. 137. Pp. 107695. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107695.
4. Visser L.R., et al. Regulation strategies for mitigating voltage fluctuations induced by photovoltaic solar systems in an urban low-voltage grid // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2022. Vol. 137. Pp. 107695. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107695.
5. Niyozov N.N., Liu C., Usmonov E.G. An overview of the current approaches to evaluating the stability and reliability of power systems with large-scale renewable energy integration // Proceedings of the Republican Scientific-Technical Conference "Development of Modern Electric Machines and Drives for Green Economy", 15–16 May 2025, Tashkent, Uzbekistan. Tashkent, 2025. Pp. 126–128.
6. Gonzalez-Longatt F., Wall P. Impact of high penetration of renewable energy sources on the power system stability // Renewable Energy. 2019. Vol. 135. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.renene.2018.11.002.
7. Liu C., Niyozov N.N., Usmonov E.G. Development of a mathematical model for the equivalent external characteristics of a power system integrated with large-scale renewable energy sources and analysis of their impact on frequency and voltage stability // Proceedings of the Republican Scientific-Technical Conference "Development of Modern Electric Machines and Drives for Green Economy", 15–16 May 2025, Tashkent, Uzbekistan. Tashkent, 2025. Pp. 135–137.
8. Niyozov N.N., Liu C., Usmonov E.G. Algorithmic approach to frequency and voltage control for static and dynamic stability analysis in electrical power networks // Proceedings of the Republican Scientific-Technical Conference "Development of Modern Electric Machines and Drives for Green Economy", 15–16 May 2025, Tashkent, Uzbekistan. Tashkent, 2025. Pp. 418–421.
9. Rakhmonov I.U., Ushakov V.Ya., Niyozov N.N., Kurbonov N.N. Прогнозирование электропотребления с помощью нейронных сетей с LSTM // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2023. Т. 334. № 12. С. 125–133. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4407.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭВРИСТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ PSS ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ЗАПАДНОЙ ЗОНЫ КАЗАХСТАНА

Васильев Д.С., Серік С.А.*, Кенесов Е.К., Бектимиров А.Т.,
Карибаев Т.Д.

Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы,
Казахстан

e-mail: d.vassilyev@aes.kz, sa.serik@aes.kz, yer.kenessov@aes.kz,
abektim@gmail.com, t.karibaev@aes.kz

Аннотация. В статье рассматривается проблема низкочастотных колебаний в энергосистеме западной зоны Казахстана, обусловленных её структурными особенностями и низкой инерционностью. Для повышения динамической устойчивости исследуется применение стабилизаторов системного возбуждения (PSS), эффективность которых во многом определяется корректностью выбора параметров. Показаны ограничения традиционных методов настройки, основанных на линейных моделях, и обоснована целесообразность использования эвристических алгоритмов оптимизации. В работе реализован подход к оптимизации параметров PSS с использованием метода роя частиц (PSO) на математической модели энергосистемы западного региона Казахстана. Результаты моделирования демонстрируют, что оптимизированные параметры обеспечивают существенное снижение амплитуды и времени затухания частотных колебаний по сравнению с отсутствием PSS и использованием типовых настроек. Полученные данные подтверждают эффективность предложенного подхода и его практическую значимость для повышения надежности энергоснабжения региона.

Ключевые слова: динамическая устойчивость, низкочастотные колебания, стабилизатор системного возбуждения (PSS), эвристическая оптимизация, рой частиц (PSO).

Введение

Рост доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в электроэнергетической системе сопровождается повышением сложности процессов управления и ведения режимов энергосистем. Одной из наиболее актуальных проблем в таких условиях остаётся обеспечение динамической устойчивости при различных возмущениях.

Вопрос обеспечения динамической устойчивости в западной зоне Единой энергосистемы (ЕЭС) Казахстана приобретает особую значимость в силу специфики её структуры и режимных характеристик. Данная зона функционирует изолированно и не располагает мощными электрическими

связями с другими регионами страны, что обуславливает необходимость поддержания устойчивости исключительно за счёт внутренних ресурсов. При этом отсутствие крупных тепловых станций и гидроэлектростанций, традиционно выполняющих роль «демпферов» колебательных процессов, повышает уязвимость энергосистемы к аварийным отключениям и резким возмущениям. В результате даже локальные возмущения приводят к значительным отклонениям частоты и возникновению колебательных процессов, которые могут приобретать низкочастотный характер. Эти колебания, будучи недостаточно затухающими, существенно снижают способность энергосистемы противостоять динамическим нарушениям и представляют серьёзную угрозу её надёжной работе [1].

Для подавления низкочастотных колебаний традиционно применяются стабилизаторы системного возбуждения или PSS - Power System Stabilizers. Однако эффективность PSS в значительной мере зависит от точности настройки его параметров, которая в реальных энергосистемах осложняется изменчивостью режимов, нелинейностью характеристик и неопределённостью внешних воздействий [2].

Классические методы настройки, основанные на линейных моделях таких, как метод корневых годографов [3] или частотный анализ [4] не всегда обеспечивают требуемое качество демпфирования. В связи с этим в последние годы особый интерес представляют эвристические алгоритмы оптимизации (генетические алгоритмы, рой частиц, алгоритмы, вдохновлённые природой), которые позволяют учитывать нелинейные эффекты, многокритериальные показатели качества и широкий диапазон изменения режимов. Применение эвристической оптимизации параметров PSS открывает возможности для значительного повышения динамической устойчивости энергосистемы западной зоны Казахстана. В настоящей работе рассматривается задача выбора и настройки параметров PSS с использованием эвристического алгоритма.

Цель исследования заключается в разработке и апробации подхода к оптимизации параметров PSS с использованием эвристического метода для улучшения динамической устойчивости энергосистемы западного региона Казахстана.

1. Низкочастотные колебания в энергосистемах и роль стабилизаторов PSS

Низкочастотные колебания (НЧК) в энергосистемах представляют собой затухающие либо слабо затухающие колебательные процессы с диапазоном частот от 0,1 до 4,0 Гц. Они возникают вследствие дисбаланса между электромагнитным и электромеханическим моментом синхронных генераторов при возмущениях в системе. В литературе выделяют локальные колебания (локальные моды), обусловленные взаимодействием отдельных генераторов с сетью, и межсистемные колебания (интерзональные моды), формирующиеся в слабых межсистемных связях при обмене мощностью между крупными

энергетическими районами. Характерной особенностью НЧК является их устойчивое воспроизведение при повторяющихся возмущениях и чувствительность к параметрам генераторов, систем возбуждения и нагрузок [5-8].

НЧК представляют серьёзную угрозу для динамической устойчивости энергосистем. Недостаточный уровень демпфирования приводит к тому, что колебания мощности и углов роторов синхронных генераторов затухают медленно или переходят в нарастающие режимы. Это вызывает:

- снижение пропускной способности межсистемных связей;
- ограничения на передачу активной мощности;
- повышение риска разделения энергосистемы на изолированные части;
- рост вероятности каскадных отключений и системных аварий.

Практика эксплуатации энергосистем показывает, что критическим считается коэффициент демпфирования ниже 5–10%. При таких условиях даже малые возмущения (отключение линии, изменение режима генерации или нагрузки) способны инициировать устойчивые колебательные процессы [9].

Системный стабилизатор (PSS) представляет собой дополнительное устройство, включаемое в структуру системы возбуждения синхронного генератора для обеспечения дополнительного демпфирующего момента. Принцип работы PSS основан на формировании корректирующего управляющего сигнала на обмотку возбуждения генератора пропорционально изменению угловой скорости ротора (или её производных). Этот сигнал изменяет возбуждение так, чтобы компенсировать колебания электромагнитного момента и обеспечить затухание НЧК.

Ключевые особенности PSS:

- увеличивает коэффициент демпфирования колебаний в диапазоне 0,2–2,0 Гц;
- позволяет повысить предельно допустимые перетоки мощности по межсистемным линиям;
- снижает вероятность разделения системы на изолированные районы;
- применяется как в локальных задачах (устойчивость отдельных генераторов), так и для координированного управления колебаниями в крупных энергосистемах.

На практике PSS реализуется в виде набора фильтров и усилителей (типовые структуры — PSS2A, PSS2B и др.), параметры которых подбираются с учётом характеристик генератора и сети. Эффективность PSS подтверждена мировой эксплуатационной практикой (США, Европа, Китай), где использование стабилизаторов позволило существенно повысить уровень демпфирования межсистемных колебаний [10-11].

Результативность работы PSS в значительной степени определяется корректностью выбора и настройки их параметров, так как неподходящие значения могут не только снизить эффект демпфирования, но и привести к ухудшению колебательных характеристик системы.

2. Методы настройки параметров PSS

Важно отметить, что выбор оптимальных параметров устройств PSS при моделировании возможен только при условии адекватности и достоверности модели энергосистемы. Иными словами, эффективность настройки стабилизаторов напрямую зависит от того, насколько точно модель отражает реальные динамические процессы, режимные характеристики и взаимодействие элементов системы.

Традиционные подходы к настройке параметров PSS основаны на линейных моделях энергосистемы. Наиболее применяемыми являются метод корневых годографов [12], частотный метод и методы оптимальных настроек на основе интегральных критериев (ISE, ITAE и др.) [13-15]. Данные методы позволяют обеспечить удовлетворительное качество демпфирования в условиях фиксированных режимов. Однако их недостатками являются чувствительность к изменению параметров системы, необходимость точных математических моделей и ограниченные возможности при учёте нелинейных эффектов.

С развитием вычислительной техники возрос интерес к применению эвристических и метаэвристических алгоритмов для настройки PSS. Среди них широкое распространение получили генетический алгоритм GA - Genetic Algorithm [16], оптимизация роем частиц PSO - Particle Swarm Optimization [17], а также алгоритмы, вдохновлённые природой: оптимизация серым волком, пчелиный алгоритм, алгоритм кита, и др [18-20]. Эти методы позволяют учитывать нелинейность моделей, изменчивость режимов и многокритериальные показатели качества. Исследования показывают, что применение эвристических алгоритмов позволяет значительно повысить коэффициент демпфирования, уменьшить время затухания колебаний и обеспечить устойчивость системы в более широком диапазоне возмущений.

Большинство работ в данной области выполнено на тестовых моделях энергосистем IEEE (например, 9-bus, 39-bus) или на крупных объединённых энергосистемах. В то же время вопросы применения эвристической оптимизации параметров PSS в условиях региональных энергосистем с ограниченными резервами мощности и слабой связностью, характерными для западной зоны Казахстана, остаются недостаточно изученными.

Таким образом, в научной литературе прослеживается явная тенденция к применению эвристических алгоритмов для оптимизации параметров PSS. Однако сохраняется потребность в исследованиях, направленных на адаптацию данных методов к специфике изолированных и уязвимых энергосистем, что и определяет актуальность настоящей работы.

3. Оптимизация параметров PSS в модели энергосистемы западного региона Казахстана

Выбор западной зоны Казахстана в качестве объекта исследования обусловлен его уязвимостью к низкочастотным колебаниям и общими особенностями структуры сети. Этот регион соединён с ЕЭС Казахстана

единственной линией 220 кВ «Уральск – Атырау – Мангистау», что предопределяет слабую межсистемную связь и ограниченные возможности по передаче мощности. Электроснабжение обеспечивается локальными источниками генерации — Атырауской ТЭЦ, комплексом электростанций МАЭК, Карабатанской ГТЭС и рядом газотурбинных установок на нефтедобывающих объектах, — при этом нагрузка региона неуклонно растёт за счёт промышленного сектора и интеграции возобновляемых источников. В совокупности эти факторы создают высокий риск возникновения и развития НЧК, что подтверждается аварийными событиями последнего времени, включая изолированную работу Атырауского и Мангистауского энергоузлов в июле 2023 года.

Для анализа динамической устойчивости и проверки эффективности оптимизации параметров PSS разработана математическая модель энергосистемы западной зоны Казахстана. Модель реализована в программной среде DIgSILENT PowerFactory. Каждый генератор описывается уравнениями движения ротора и моделью синхронной машины с шестью порядками. Для возбуждения применяется модель автоматического регулятора возбуждения (АРВ) с включённым PSS.

В качестве возмущений рассматривается короткое замыкание с дальнейшим отключением линии электропередачи 220 кВ «МАЭК - Бейнеу».

Задача оптимизации формулировалась как поиск оптимальных параметров PSS, обеспечивающих минимизацию амплитуды и времени затухания колебаний частоты:

$$T_{\text{затухания}} = f(T_{w1}, T_{w2}, T_{w3}, T_{w4}, T_{s1}, T_{s2}, T_{s3}, T_{s4}, K_{s1}, K_{s2}, K_{s3}),$$

где $T_{w1}, T_{w2}, T_{w3}, T_{w4}$ – постоянные времени фильтров washout;

K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} – коэффициенты усиления PSS;

$T_{s1}, T_{s2}, T_{s3}, T_{s4}$ – коэффициенты фазового сдвига.

Washout-фильтр — это фильтр высоких частот (обычно реализуется как звено первого порядка) основная задача которого - пропускать только колебательные (переменные) составляющие сигнала и «смывать» (washout) постоянную или очень медленно изменяющуюся часть.

Коэффициенты фазового сдвига (Lead-Lag Time Constants) формируют фазовый сдвиг, чтобы демпфирующий сигнал совпадал по фазе с колебаниями ротора. Подбор этих параметров критичен для эффективности PSS — если фаза не компенсирована, стабилизатор может не только не гасить, но и усиливать колебания.

Коэффициенты усиления PSS масштабируют сигнал с датчиков (скорость, частота). Влияют на амплитуду входного сигнала, а значит и на уровень демпфирования.

Для количественной оценки качества работы PSS использовались два показателя:

1) Амплитуда колебаний частоты после возмущения, отражающая уровень отклонения системы от номинального значения.

2) Время затухания колебаний частоты, характеризующее скорость восстановления устойчивого режима.

Для настройки параметров использовался метод Particle Swarm Optimization (PSO), имитирующий коллективное поведение агентов (частиц), перемещающихся в поисковом пространстве. Применение данного алгоритма обусловлено его преимуществами: высокая скорость сходимости, простота реализации и устойчивость к попаданию в локальные минимумы.

Этапы оптимизации:

1) Инициализация популяции - случайное задание начальных параметров PSS в допустимых диапазонах.

2) Моделирование энергосистемы - для каждого набора параметров выполнялась имитация отключения ВЛ 220 кВ.

3) Оценка критериев - вычислялись амплитуда и время затухания колебаний частоты.

4) Обновление частиц - параметры корректировались на основе индивидуального и глобального лучшего решения.

5) Критерий остановки - достижение максимального числа итераций или стабилизация функции приспособленности.

В алгоритме PSO каждая частица представляет собой возможное решение задачи, то есть вектор параметров PSS:

$$X_i = \{T_{w1}, T_{w2}, T_{w3}, T_{w4}, T_{s1}, T_{s2}, T_{s3}, T_{s4}, K_{s1}, K_{s2}, K_{s3}\},$$

где X_i – положение i -й частицы в пространстве поиска, а координаты соответствуют настраиваемым параметрам стабилизатора.

Каждая частица обладает скоростью V_i , которая определяет направление и величину её перемещения:

$$V_i^{k+1} = \omega \cdot V_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (Pbest_i - X_i^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (G_{best} - X_i^k),$$

где ω – коэффициент инерции, отвечающий за сохранение предыдущего направления движения,

c_1, c_2 – коэффициент обучения,

$r_1, r_2 \in [0, 1]$ – случайные числа,

$Pbest_i$ – лучшее найденное положение данной частицы,

G_{best} – лучшее положение среди всего роя.

Положение частицы обновляется по формуле:

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1}$$

Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто условие остановки (ограничение по числу итерации или достижение заданной точности).

В результате работы алгоритма PSO получен набор параметров PSS, при котором достигается существенное снижение амплитуды колебаний частоты и сокращение времени их затухания по сравнению с традиционной настройкой.

Для оценки эффективности оптимизации параметров PSS были выполнены моделирования переходных процессов в энергосистеме западной зоны Казахстана при возмущении, вызванном отключением ВЛ 220 кВ. Сравнительный анализ проводился для трёх сценариев:

- работа энергосистемы без применения PSS;
- применение PSS со стандартными (типовыми) настройками;
- применение PSS с параметрами, оптимизированными методом PSO.

На рисунке 1 представлены осциллограммы частоты на ПС МАЭК 220 кВ при отключении линии 220 кВ «МАЭК - Бейнеу» без использования PSS. Видно, что возмущение вызывает значительные колебания частоты с высокой амплитудой и длительным временем затухания. Система сохраняет устойчивость, однако процесс восстановления занимает продолжительное время, что создаёт риски для надёжности энергоснабжения.

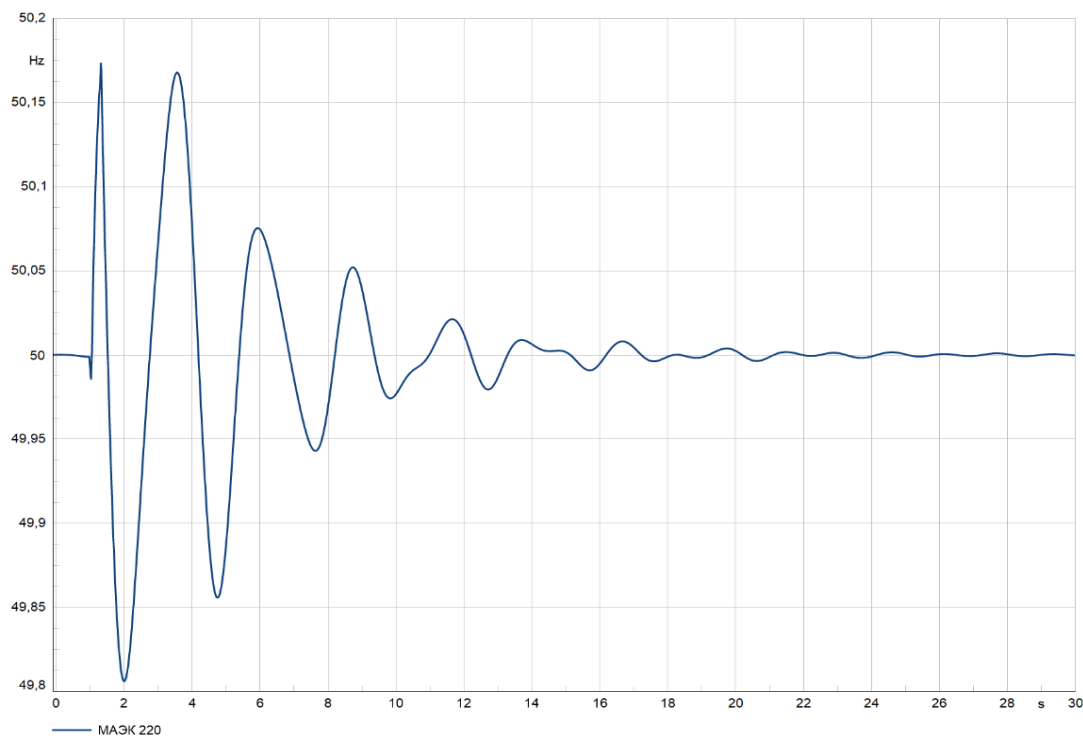


Рисунок 1 – Графики частоты без применения PSS

На рисунке 2 показаны переходные процессы при использовании PSS с типовыми параметрами. В этом случае амплитуда колебаний частоты снижается по сравнению с предыдущим сценарием, а процесс затухания ускоряется. Тем не менее, остаточные колебания сохраняются достаточно продолжительное время, что указывает на ограниченную эффективность стандартной настройки в условиях рассматриваемой энергосистемы.

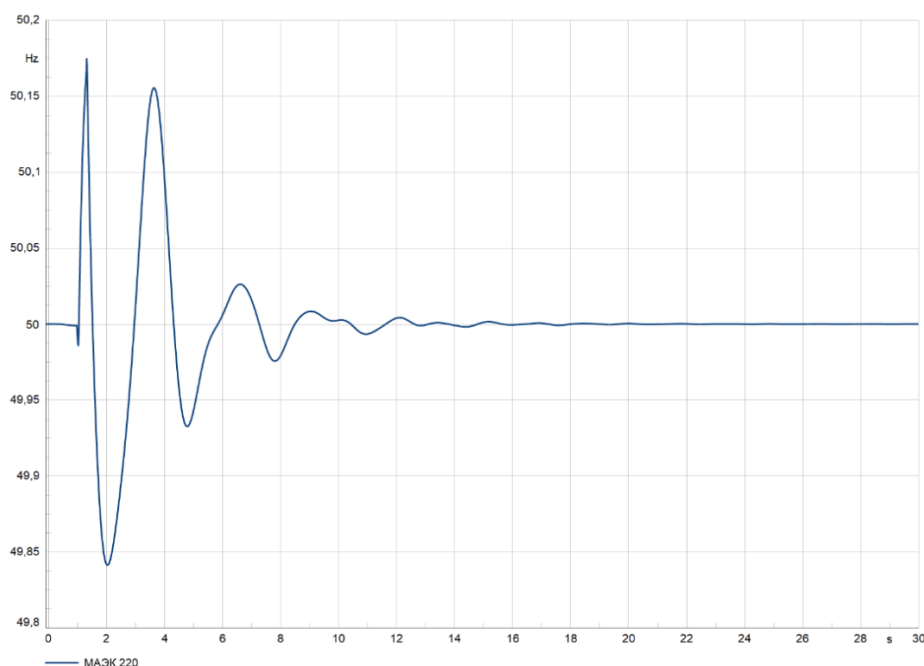


Рисунок 2 – Графики частоты с применением PSS (стандартные настройки)

На рисунке 3 приведены графики частоты при использовании PSS, параметры которого были оптимизированы с применением алгоритма PSO. Результаты показывают значительное улучшение:

- амплитуда отклонений частоты существенно снижена;
- время затухания сокращено почти в два раза по сравнению с базовой настройкой;
- система быстрее возвращается к установившемуся режиму, демонстрируя более высокую устойчивость.

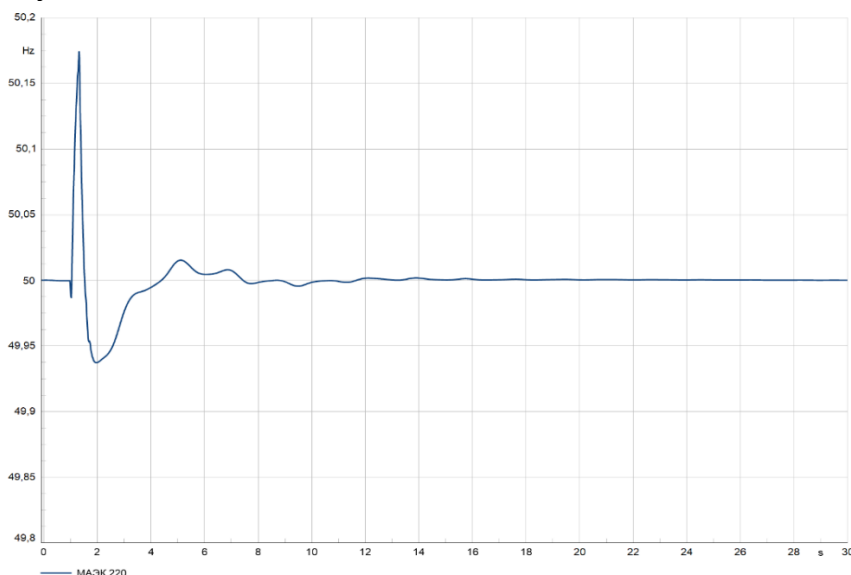


Рисунок 3 – Графики частоты с применением PSS (после оптимизации)

Для наглядной иллюстрации влияния оптимизации параметров PSS на динамику системы был построен график зависимости времени переходного

процесса от вариации параметров стабилизатора (рисунок 4). Из графика видно, что оптимизированные значения, найденные с помощью PSO, обеспечивают наименьшее время восстановления системы, что подтверждает эффективность выбранного метода оптимизации.

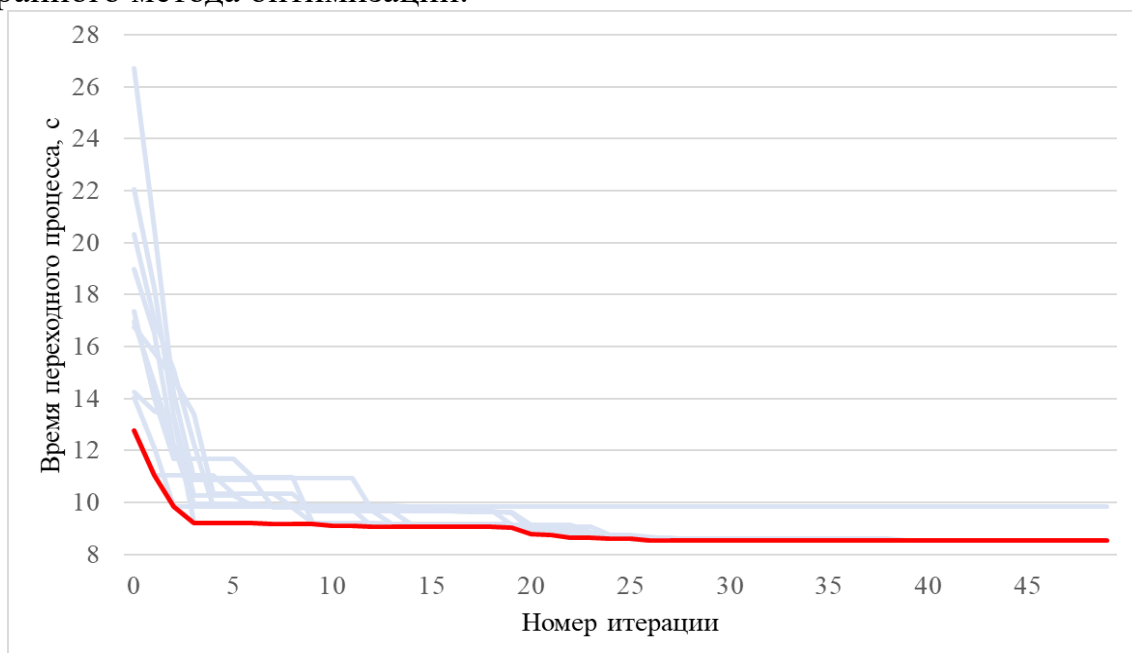


Рисунок 4 – Изменение времени переходного процесса при подборе параметров PSS

Сравнительные результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

- отсутствие PSS приводит к высоким амплитудам и длительным колебаниям частоты;
- стандартные настройки PSS улучшают ситуацию, но не обеспечивают достаточного уровня демпфирования;
- оптимизированные параметры, полученные с помощью PSO, значительно повышают качество переходного процесса, сокращая как амплитуду, так и длительность колебаний частоты.

Закключение

В ходе исследования была рассмотрена задача повышения динамической устойчивости энергосистемы западной зоны Казахстана при возмущениях, вызванных отключением линии электропередачи 220 кВ. Для стабилизации колебательных процессов использовались стабилизаторы системного возбуждения (PSS), параметры которых оптимизировались с применением эвристического алгоритма Particle Swarm Optimization (PSO).

Проведенные расчеты и моделирование показали, что отсутствие стабилизаторов приводит к значительным отклонениям частоты и длительным колебаниям, создающим угрозу надежной работе энергосистемы. Применение PSS со стандартными настройками частично улучшает качество переходных процессов, однако не обеспечивает требуемого уровня демпфирования. В то же

время оптимизация параметров PSS с использованием алгоритма PSO позволила существенно снизить амплитуду колебаний частоты и значительно сократить время их затухания, что подтверждает эффективность предложенного подхода.

Таким образом, применение эвристической оптимизации при настройке PSS обеспечивает существенное повышение устойчивости энергосистемы западной зоны Казахстана и улучшение качества переходных процессов. Практическая значимость проведенной работы заключается в возможности использования разработанного подхода при эксплуатации генерирующих источников региона.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку методов многокритериальной оптимизации, позволяющих учитывать не только характеристики частотных колебаний, но и угловую динамику генераторов и потоковую устойчивость. Перспективным направлением является также совместная настройка параметров различных устройств, включая PSS, FACTS и системы накопления энергии, а в дальнейшем — применение адаптивных методов оптимизации в реальном времени на основе интеллектуальных алгоритмов.

Список литературы

- [1] A. T. Bektimirov, K. K. Tokhtibakiyev, A. A. Saukhimov and N. N. Nurtaza, "Analysis of the Kazakhstan's Grid Oscillation Instability by using Wams System and PSCAD Program," 2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Bucharest, Romania, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/UPEC.2019.8893487.
- [2] J. Pesente, M. L. S. Rios, P. H. Galassi and R. A. Ramos, "A comparative study among PSS tuning methods for the Itaipu 50Hz plant to enable the Paraguayan-Argentinean interconnection," 2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), São Paulo, Brazil, 2021, pp. 203-210, doi: 10.1109/INDUSCON51756.2021.9529486.
- [3] Krall A. M. The root locus method: a survey //SIAM Review. – 1970. – T. 12. – №. 1. – С. 64-72.
- [4] Bollinger, K. E., R. Winsor, and A. Campbell. "Frequency response methods for tuning stabilizers to damp out tie-line power oscillations: Theory and field-test results." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 5 (2007): 1509-1515. doi: 10.1109/TPAS.1979.319463.
- [5] Rudnik V. E., Ufa R. A., Malkova Y. Y. Analysis of low-frequency oscillation in power system with renewable energy sources //Energy Reports. – 2022. – T. 8. – С. 394-405. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.07.022>
- [6] Klimova T. G., Savvatin M. V. Sources of Low-Frequency Oscillations in Power Systems, Their Localization and Damping //Power Technology and Engineering. – 2024. – T. 57. – №. 6. – С. 955-968. <https://doi.org/10.1007/s10749-024-01763-5>

- [7] Jin T. et al. A method for the identification of low frequency oscillation modes in power systems subjected to noise //Applied Energy. – 2017. – T. 206. – C. 1379-1392.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.123>
- [8] Prasertwong K., Mithulanathan N., Thakur D. Understanding low-frequency oscillation in power systems //International Journal of Electrical Engineering Education. – 2010. – T. 47. – №. 3. – C. 248-262.
<https://doi.org/10.7227/IJEEE.47.3.2>
- [9] Liu Q. et al. Modal Analysis of Low-Frequency Oscillations in Power Systems Based on Small-Signal Analysis Considering the Interaction of Physical and Virtual Inertia //International Conference on Computing, Intelligence and Data Analytics. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. – C. 815-822.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-87154-2_64
- [10] Dysko A., Leithead W. E., O'Reilly J. Enhanced power system stability by coordinated PSS design //IEEE Transactions on Power Systems. – 2009. – T. 25. – №. 1. – C. 413-422.
doi: 10.1109/TPWRS.2009.2036704.
- [11] Sarwar M. et al. Stability enhancement of grid-connected wind power generation system using PSS, SFCL and STATCOM //IEEE Access. – 2023. – T. 11. – C. 30832-30844.
doi: 10.1109/ACCESS.2023.3262172.
- [12] Yu, J., Wang, K., Chen, M., Jiang, S., Chen, J. (2021). Coordinated Setting Method of PSS and PSVR Parameters in Generator. In: Li, K., Coombs, T., He, J., Tian, Y., Niu, Q., Yang, Z. (eds) Recent Advances in Sustainable Energy and Intelligent Systems. LSMS ICSEE 2021 2021. Communications in Computer and Information Science, vol 1468. Springer, Singapore.
doi.org/10.1007/978-981-16-7210-1_30
- [13] Obaid Z. A., Cipcigan L. M., Muhssin M. T. Power system oscillations and control: Classifications and PSSs' design methods: A review //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – T. 79. – C. 839-849.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.103>
- [14] Mohandes B., Abdelmagid Y. L., Boiko I. Development of PSS tuning rules using multi-objective optimization //International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2018. – T. 100. – C. 449-462.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.01.041>
- [15] Mohapatra S. K., Senapati M. K., Dash S. K. Coordinated design of PSS and AVR for stability enhancement using differential evolution algorithm //Sixth International Conference on Intelligent Computing and Applications: Proceedings of ICICA 2020. – Singapore : Springer Singapore, 2021. – C. 387-396.
https://doi.org/10.1007/978-981-16-1335-7_35
- [16] Alhijawi B., Awajan A. Genetic algorithms: Theory, genetic operators, solutions, and applications //Evolutionary Intelligence. – 2024. – T. 17. – №. 3. – C. 1245-1256.
<https://doi.org/10.1007/s12065-023-00822-6>

- [17] Shami T. M. et al. Particle swarm optimization: A comprehensive survey //Ieee Access. – 2022. – Т. 10. – С. 10031-10061.
doi: 10.1109/ACCESS.2022.3142859.
- [18] Makhadmeh S. N. et al. Recent advances in Grey Wolf Optimizer, its versions and applications //Ieee Access. – 2023. – Т. 12. – С. 22991-23028.
doi: 10.1109/ACCESS.2023.3304889.
- [19] Kaya E. et al. A review on the studies employing artificial bee colony algorithm to solve combinatorial optimization problems //Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2022. – Т. 115. – С. 105311.
<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105311>
- [20] Nadimi-Shahraki M. H. et al. A systematic review of the whale optimization algorithm: theoretical foundation, improvements, and hybridizations //Archives of Computational Methods in Engineering. – 2023. – Т. 30. – №. 7. – С. 4113-4159.
<https://doi.org/10.1007/s11831-023-09928-7>

ӘОЖ 621.31

ЭЛЕКТР БЕРІЛІС ЖЕЛІЛЕРІНІҢ АҒЫМДАҒЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ РЕЖИМІН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ АҒЫННЫҢ ТАРАЛУЫН ЕСЕПТЕУДІ ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ТАЛДАУ

Ыбырайхан К.А.

Ғ.Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан

*e-mail: ka.ybyraikhan@aues.kz

Кіріспе

Қазіргі қоғамда электр энергетикасының дамуы сенімділік пен энергия тиімділігіне қойылатын талаптардың артуымен қатар жүруде. Соңғы жылдары қоршаған орта температурасының электр желілерінің жұмысына әсері зерттеушілердің назарын аударды. Себебі температураның жоғарылауы сымдардың электрлік және механикалық сипаттамаларының өзгеруіне әкеледі, бұл электр желісінің тұрақтылығы мен сенімділігіне әсер етеді. Біз үшін бұл проблеманың айрықша өзектілігі бар, өйткені елдің климаты жыл бойы температураның үлкен ауытқуымен ерекшеленеді. Жазда оңтүстік аймақтардағы ауа температурасы +40 °С және одан жоғары болуы мүмкін, бұл өз кезегінде электр желілерінің сымдарының айтарлықтай қызуына, электр кедергісінің өсуіне септігін тигізеді және қуат шығынын арттырады. Қыста төмен температурада сымның кедергісі төмендейді, бұл энергия ағындарының таралуына басқаша әсер етеді [1,2].

Әлемдік тәжірибеде энергия жүйелерін есептеудегі климаттық жағдайларды есепке алу мәселесі әртүрлі жолдармен шешіледі. Мысалы, IEEE және CIGRE стандарттары температура мен ауа-райы факторларының ауа желілерінің рұқсат етілген жүктемесіне әсерін қарастыратын модельдерді ұсынады. Алайда, режимдердің практикалық есептеулерінің көпшілігінде қазіргі температура режимін ескермейтін жеңілдетілген модельдер қолданылады.

Бұл зерттеудің мақсаты ауа желілерінің кедергісіне температураның әсерін ескере отырып, электр энергетикалық жүйелердегі ағынның таралуын талдау және салыстырмалы есептеулер жүргізу болып табылады.

Зерттеу мақсаты мен міндеттері

Мақсаты: Әуе электр желілерінің ағымдағы температуралық режимнің олардың өткізу қабілетіне және тұтастай алғанда жүйенің жұмысына әсерін ескере отырып, электр энергетикалық жүйелерінде қуат ағынын бөлуді есептеу әдістерін жетілдіру және талдау.

Міндеттері:

1. Электр энергетикалық жүйелердегі ағындарды бөлуді есептеудің теориялық негіздерін қарастыру;
2. Электр берудің әуе желілерінің температуралық режимінің ерекшеліктерін және оның электрлік параметрлері мен желілердің өткізу қабілетіне әсерін зерттеу;
3. Қолданыстағы қуат ағынын бөлу, есептеу алгоритмдерін талдау;
4. Температура факторын ескере отырып, қуат ағынын бөлуді есептеу моделін әзірлеу немесе бейімдеу;
5. Сынақ жүйесінде есептеу эксперименттерін жүргізу және алынған нәтижелерді классикалық әдістермен салыстыру;
6. Нәтижелерді талдау негізінде электр энергетикалық жүйелердің

Зерттеу әдістемесі

Зерттеу нысаны ретінде генераторларды, жүктеме тораптарын және әуе электр желілерін қамтитын электр энергетикасы жүйесінің жеңілдетілген схемасы қарастырылды. Бұл тәсіл қосымша бөлшектермен модельді қиындатпай, температураның есептеу нәтижелеріне әсерін талдауға назар аударуға мүмкіндік береді. Алдымен бірнеше генерация және тұтыну түйіндерін, сондай-ақ осы түйіндерді байланыстыратын электр желілерін қамтитын желінің бастапқы схемасы құрылды. Әуе электр желісі үшін стандартты +20 °C температурада активті және реактивті кедергілер орнатылды. Содан кейін үш сценарий дәйекті түрде модельденді:

- +20 °C температурада негізгі режим;
- +30 °C температурада қыздырылған режим;
- +40 °C температурада ыстық режим.

Әр сценарий үшін әуе электр желісінің активті кедергісі температураға тәуелділікпен қайта есептелді [3]:

$$R_T = R_1 \cdot (1 + \alpha(T_2 - T_1)) \quad (1)$$

мұндағы R_T, R_1 – әуе электр желісінің кедергілері; α – температураға төзімділік коэффициенті; T_2, T_1 – температура (градус).

Әрбір әуе желісі үшін параметрлерді қайта есептегеннен кейін деректер кестеге енгізілді. Әрі қарай Ньютон–Рафсон әдісімен ағынның таралуын есептеу жүргізілді. Есептеу процесінде кезекті шамалар анықталды:

- желілер бойынша қуат ағындары;
- түйіндердегі кернеу деңгейлері;
- белсенді қуаттың жалпы шығыны.

Алынған нәтижелер есепке алынып, бір-бірімен салыстырылды, бұл ауа температурасының жоғарылауымен желі режимдерінің өзгеру заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік береді.

Нәтижелер және талқылау

Алынған нәтижелерді талдау барысында қоршаған орта температурасының жоғарылауы электр энергетикасы жүйесінің жұмыс параметрлеріне айтарлықтай әсер ететіндігін көрсетті. Кестеде жеңілдетілген есептеу нәтижелері келтірілген:

1 – кесте. Әуе желісі үшін есептелген мәліметтер.

Ауа температурасы	Желінің кедергісі(сал.б)	Қуаттың жалпы шығыны , МВт	Жүктеме тораптарындағы орташа кернеу, кВ
20	1,00	5,2	9,85
30	1,04	5,8	9,72
40	1,08	6,5	9,6

Жүргізілген есептеулер қоршаған ортаның температурасы қуат ағындарының таралуына және электр энергетикасы жүйесінің жұмысының жалпы сипаттамаларына айтарлықтай әсер ететіндігін көрсетті. Модельдеу кезінде температураның 10-20 °С шамалы өзгеруі де жеке желілердің қуатын, кернеу деңгейін және жүктемесін жоғалтуда айтарлықтай өзгерістерге әкелуі мүмкін екендігі анықталды. Біріншіден, белсенді қуат шығындарының өсуі байқалады. Кестеден көріп отырғаныңыздай, ауа температурасы +20 °С-тан +40 °С-қа дейін көтерілгенде, жалпы шығындар шамамен 1,3 МВт-қа артады. Бұл бастапқы деңгейдің шамамен 25% құрайды, бұл өте жоғары көрсеткіш. Берілген есептеулер желінің шағын жеңілдетілген моделі үшін жасалғанын ескеру қажет. Жалпы қуат шығыны ондаған және жүздеген мегаваттпен өлшенетін нақты энергия жүйелерінде мұндай өсім жылына жүздеген мың, тіпті миллиондаған долларға қосымша экономикалық шығындарды білдіруі мүмкін. Екіншіден, жүктеме түйіндеріндегі кернеулердің төмендеуі анықталды. Ауа температурасының жоғарылауымен кернеу орташа есеппен 0,25 кВ-қа төмендеді. практикалық тұрғыдан алғанда, бұл жоғары температурада кернеудің рұқсат етілген шектерден шығу қаупі артады дегенді білдіреді. Соңғы тұтынушылар

үшін бұл электр энергиясының сапасының нашарлауы, жабдықтың қызып кетуі және оның мерзімінен бұрын істен шығуы түрінде көрінуі мүмкін. Үшіншіден, есептеулер қуат ағындарының желілері бойынша қайта бөлінуін көрсетті.

Базалық режимде (+20 °C температурада) желілер арасындағы қуаттың таралуы салыстырмалы түрде біркелкі болды. Алайда, +40 °C дейін қызған кезде, желілердің бір бөлігі көбірек жүктелді, ал басқа желілердікі түсті. Бұл кедергілердің жоғарылауымен түсіндіріледі: желілердің бір бөлігінің белсенді кедергісі артқан кезде токтар "қысқа" немесе "тиімді" жолдардың пайдасына қайта бөлінеді.

Осылайша, температураның өзгеруі жергілікті шамадан тыс жүктемелерді тудыруы мүмкін, тіпті орташа жүйе қолайлы режимде жұмыс істесе де. Желілердің рұқсат етілген ток жүктемесіне ерекше назар аудару керек. Температураның жоғарылауымен сымдардағы ток қосымша қызуды тудырады, бұл сымдардың салбырап кетуіне және ағаштармен немесе ғимараттармен қысқа тұйықталу ықтималдығының жоғарылауына әкелуі мүмкін.

Халықаралық стандарттарда (мысалы, IEEE Std 738-2012) ауа температурасы +40 °C және күн радиациясы кезінде ауа желілерінің рұқсат етілген жүктемесі 10-15% төмендеуі мүмкін екендігі көрсетілген. Бұл ыстық маусымда электр желілерін пайдалануға қосымша шектеулер қояды.

Егер пайдаланудың нақты жағдайларын қарастыратын болсақ, онда Қазақстанда жазғы кезеңде оңтүстік өңірлердегі ауа температурасы бірнеше апта бойы +35... + 40 °C деңгейінде сақталуы мүмкін. Бұл тек стандартты +20 °C температурада орындалған есептеу режимдері нақты қуат шығынын азайтады және желідегі нақты жүктемені көрсетпейді дегенді білдіреді. Нәтижесінде жүйе бастапқыда ойлағаннан аз тұрақты болуы мүмкін.

Практикалық тұрғыдан алғанда, нәтижелер электр желілерінің жұмыс режимдерін жоспарлау кезінде температура факторын дәлірек ескеру қажеттілігін көрсетеді. Мәселен, бірқатар елдерде (АҚШ, Канада, Германия) ағымдағы ауа температурасы, желдің жылдамдығы және күн радиациясы нақты уақыт режимінде ескерілетін ӘЖ өткізу қабілеттілігінің динамикалық мониторингі жүйесі енгізілуде [4]. Қазақстанда мұндай технологиялар әзірге енгізу сатысында тұр, алайда оларды пайдалану қажеттілігі айқын. Жалпы, жүргізілген зерттеу ауа температурасын есепке алу электр желісінің жұмысын объективті бағалауға және ықтимал кедергілерді алдын-ала анықтауға мүмкіндік беретіндігін көрсетеді.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу нәтижелері әуе электр жеткізу желілерінің температуралық режимі электр энергетикалық жүйелердегі ағындарды бөлу есебіне айтарлықтай әсер ететінін растады. Температураның жоғарылауы өткізгіштердің активті кедергісінің өсуіне алып келеді, бұл өз кезегінде қуат шығындарының артуына, жүктеме тораптарындағы кернеу деңгейінің төмендеуіне және желілер бойынша ағындардың қайта бөлінуіне себеп болады.

Мұндай құбылыстар Қазақстанның бірқатар өңірлеріне тән жоғары жазғы температура жағдайында энергожүйені пайдалануды едәуір күрделендіреді.

Айрықша мәнге ие жайт – дәстүрлі есептеу алгоритмдері, әдетте, желілер параметрлерінің +20 °C стандартты температурадағы анықтамалық мәндеріне сүйенеді. Соның салдарынан нақты пайдалану жағдайлары ескерусіз қалып, энергожүйенің сенімділігі мен үнемділігін бағалауда қателіктерге әкелуі мүмкін. Ал нақты температураны есепке алу модельдеудің дәлдігін арттырып, жүйе жұмысына қатысты болжамдарды шынайы етуі тиіс [5].

Осы кезеңде температураның әуе желілерінің параметрлеріне әсерін модельдеу әдістемесі жасалып, *RastrWin3* бағдарламасы негізінде сынақ желі моделінде ағындарды бөлу есептері жүргізіледі.

Әдебиеттер тізімі

1. Yu J., Liu Z., Lin Y., et al. Discussion on AC Resistance and Temperature of ACSR Conductors // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, No. 19. – P. 8982.
2. Sterc T., Gabrovšek M., Blažič B. Methods for Estimation of OHL Conductor Temperature Considering Environmental Conditions // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2023. – Vol. 155. – P. 109598.
3. Desai P., James H. M., Ho C. Y. Electrical Resistivity of Aluminum and Manganese // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. – 1984. – Vol. 13, No. 4. – P. 1069–1096.
4. Dynamic Line Rating: A Solution to Grid Congestion // *IEEE Spectrum*. – 2025. – [Электронды ресурс].
5. Google Академия (Google Scholar) – ғылыми еңбектер мен патенттерді іздеу жүйесі. – [Электронды ресурс].

УДК 621.311.

ТЕОРИЯ ГРАФОВ И ОПЕРАТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ахметбаев Д.С.¹, Ахметбаев А.Д.², Керимбеков К.Р.¹,
Кошмаганбетова А.А.²

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, г.Астана,
Казахстан axmetbaev46@mail.ru

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева,
г.Нижний Новгород, Россия, armik69@mail.ru

Аннотация

В данной работе излагается новая теория топологических алгоритмов формирования режимов сложной сети энергосистемы, которые легко

реализуются на компьютерной технике. Параметры установившегося режима определяются на основе нелинейного матричного уравнения узловых напряжений, формализованного с учетом линейных параметров сети и комплексных коэффициентов распределения задающих токов. Прямое формирование параметров режима существенно сокращает объем выполняемых работ, повышает наглядность выполнений алгоритмов расчета и обеспечивает быструю и надежную сходимость итерации, а также повышает уровень автоматизации и оперативность выполняемых расчетов.

Ключевые слова. топология, теория графов, электрические системы, матрица коэффициентов токораспределения, параметры режима.

1. Введение

Проведенные исследования [1] доказали, что трудности получения реальных решений при расчете установившихся режимов могут быть значительно преодолены, если использовать Z -формы узловых уравнений. Сложности формирования матрицы узловых сопротивлений, в определенной степени были преодолены путем использования гибридных матриц, позволяющих совместить их преимущества, представлением в виде произведений слабозаполненных матриц с использованием различных методов факторизации матриц.

Применение коэффициентов токораспределения приводит к значительному упрощению расчетов установившихся режимов сложных электрических сетей [2].

Матричные методы имеют существенные преимущества перед классическими методами, обеспечивая значительную экономию трудозатрат и времени на проведения самих расчетов [2]. Недостаток матричных расчетов сводиться к сложности обращения матрицы. Это привело к развитию топологических методов анализа электрических цепей. Впервые

разработан метод в [3], для определения элементов матрицы коэффициентов токораспределения в сложных электрических сетях. Сложность поиска возможных и выделения 2-деревьев графа тормозило развитие топологического метода в электроэнергетике [4]. Новое теоретическое направление получено на основе аналитического исследования коэффициентов токораспределения в электрических сетях [5].

2. Формирования параметров режимов электрических сетей

Алгоритм формирования установившегося режима осуществляется выражением [5,6]:

$$\dot{U} = U_0 + \underline{C}^t \underline{Z}_B \underline{C} \hat{U}_d^{-1} \hat{S} \quad (1)$$

где $\underline{C}$ –прямоугольная комплексная матрица коэффициентов токораспределения; $\underline{Z}_B$ – диагональная матрица сопротивлений ветвей; $\hat{U}_d$ – диагональная матрица узловых сопряженных напряжений; $\hat{S}$ –матрица столбец сопряженных мощностей узловых нагрузок и генераторов.

Методика формирования параметров режима зависят от формы задания генерирующих узлов. Генераторные узлы могут задаваться постоянными активными и реактивными мощностями либо активной мощностью и напряжением.

Узловое уравнение (1), после представления генераторных узлов мощностями, может быть записано для k -го узла в виде [6,7]:

$$\dot{U}_k = U_0 + \sum_{j=1}^n \underline{Z}_{kj} \hat{U}_j^{-1} (P_j - jQ_j) \quad (2)$$

где $\dot{U}_k = U'_k + jU''_k$, $\underline{Z} = \underline{C}^t \underline{Z}_v \underline{C}$

Задание какого-либо генераторного узла *напряжением и активной мощностью*, приводит к частичному изменению алгоритмов расчета искомых переменных. Предположим, параметры n -го генераторного узла заданы активной мощностью и напряжением. Тогда, искомыми параметрами режима рассматриваемого узла являются фаза δ_n узлового напряжения, и реактивная мощность Q_n . Значение реактивной мощности n -го узла определяется на основе (2) и для k -ой итерации справедливо выражение [6,8,9]:

$$Q_n^k = \frac{U_n^2 \cos \delta_n^{k-1} - U_0 U_n - Z_{nn} P_n \cos(\delta_n^{k-1} + \psi_{nn}) - \sum_{j=1}^{n-1} Z_{nj} U_n U_j^{-1(k-1)} (P_j \cos(\delta_j^{k-1} + \psi_{nj}) + Q_j \sin(\delta_j^{k-1} + \psi_{nj}))}{Z_{nn} \sin(\delta_n^{k-1} + \psi_{nn})} \quad (3)$$

Мнимая часть напряжения рассматриваемого узла, соответственно, равна:

$$U_n \sin \delta_n^k = \sum_{j=1}^{n-1} Z_{nj} U_j^{-1(k-1)} (P_j \sin(\delta_j^{k-1} + \psi_{nj}) - Q_j \cos(\delta_j^{k-1} + \psi_{nj})) + Z_{nn} U_n^{-1} (P_n \sin(\delta_n^{k-1} + \psi_{nn}) - Q_n^k \cos(\delta_n^{k-1} + \psi_{nn}))$$

Отсюда, значение фазы узлового напряжения для k -ой итерации имеет вид:

$$\delta_n^k = \arcsin \frac{U_n''^{(k)}}{U_n} \quad (4)$$

Суть итерации состоит в корректировке узловых токов. Зарядные мощности линии, потери на корону, а также потери холостого хода силовых трансформаторов учитываются соответствующими токами, зависящими от приложенного к ним напряжения, которые в процессе итерации уточняются.

3. Программная реализация алгоритмов расчета параметров режима

Рассмотрим типовой пример сети 110 кВ, исследованный для учебных целей в [10], где два генераторных узла «0» и «1» работают на общую нагрузку по кольцевой схеме с параметрами:

$$\underline{Z}_1 = 10 + j20 \text{ Ом}; \underline{Z}_2 = 10 + j25 \text{ Ом}; \underline{Z}_3 = 15 + j30 \text{ Ом}$$

при условии напряжения системы $U_0 = 115\text{кВ}$ и соответствующими мощностями станции и нагрузки

$$\dot{S}_1 = 28,8675 + j17,3205 \text{ МВА}, \dot{S}_2 = -46,1880 - j23,0940 \text{ МВА}$$

Расчеты выполнены по специально составленной программе в среде Matlab, методом простой итерации с точностью $\varepsilon = \pm 10^{-5} U_n = 0,00001$ и результаты которых приведены в таблицах 1,2.

Таблица 1. Результаты расчета режима сети рис.ба, при задании узлов активными и реактивными мощностями

№ итера.	0	1	2	3	4	5
$U'_1, \text{кВ}$	-	115,7126	115,4016	115,4105	115,4096	115,4096
$U''_1, \text{кВ}$	-	0,2703	0,2847	0,2777	0,2783	0,2782
$U_1, \text{кВ}$	110	115,7129	115,4020	115,4108	115,4100	115,4100
$\delta_1, \text{град}$	0	0,1338	0,1414	0,1379	0,1382	0,1381
$U'_2, \text{кВ}$	-	109,8411	109,6159	109,6140	109,6123	109,6123
$U''_2, \text{кВ}$	-	-4,4186	-4,1153	-4,1479	-4,1456	-4,1459
$U_2, \text{кВ}$	110	109,9300	109,6931	109,6924	109,6907	109,6907
$\delta_2, \text{град}$	0	-2,3036	-2,1500	-2,16071	-2,1660	-2,1661

Таблица 2. Результаты расчета режима сети рис ба, при задании генераторного узла напряжением $U_1 = 115.4100 \text{ кВ}$ и активной мощностью $P_1 = 28.8675 \text{ МВт}$.

№ итерац	0	1	2	3	4	5
$Q_1, \text{МВАр}$	-	16,4542	17,2586	17,2480	17,2804	17,2805
$U''_1, \text{кВ}$	-	0,1903	0,2848	0,2745	0,2749	0,2749
$\delta_1, \text{град}$	0	0,0945	0,1414	0,1363	0,1365	0,1365
$U'_2, \text{кВ}$	-	109,8151	109,6101	109,6416	109,6405	109,6406
$U''_2, \text{кВ}$	-	-4,3641	-4,0988	-4,1269	-4,1249	-4,1251
$U_2, \text{кВ}$	110	109,9018	109,7167	109,7192	109,7181	109,7181
$\delta_2, \text{град}$	0	-2,2758	-2,1410	-2,1556	-2,1546	-2,1547

По результатам расчетов табл. 1 и 2 нетрудно убедиться в том, что разработанные алгоритмы для расчета параметров режима при задании генераторного узла мощностями, а также активной мощностью и напряжением работают эффективно, и правильность выполненных расчетов подтверждаются результатами, указанными в таблицах 1 и 2 с результатами источника.

Заключение:

1.Алгоритмы расчета параметров режима не усложняются при изменении формы задания генераторных узлов.

2. Предлагаемый способ повышает оперативность расчетов оценки параметров режима электроэнергетической системы.

Литература

1. Манусов Б.З., Лыкин А.В., Сидоркин Ю.М. Алгоритмы метода Ньютона-Рафсона для решения узловых уравнений в обращенной форме // Известия вузов СССР. Энергетика, 1974, №9, с.3-7.

2. Мельников Н.А. Применение коэффициентов распределения при расчетах сложных схем замещения электрических цепей. // Электричество, 1961, № 2, с.9-13

3. Гераскин О.Т. Топологический анализ коэффициентов токораспределения в электрических сетях. Известия вузов. Энергетика, 1967, №5, с. 20–28.

4. Гераскин О.Т. Методы определения 2 - деревьев графа в топологии электрических сетей // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1967, №5, с.106-112.

5. Dauren S. Akhmetbaye, Daurenbek A. Aubakir, Yermek Zh. Sarsikkeyev, Bakhtybek A. Bainiyazov, Mikhail A. Surkov, Vitaliy I. Rozhkov, Gulbahit N. Ansabekova, Assel S. Yerbolova, Azamat T. Suleimenov, Miramgul S. Tokasheva. Development Of Topological Method For Calculating Current Distribution Coefficients In Complex Power// Networks, Results in Physics, 2017, 7, pp. 1644-1649.

6. Ахметбаев Д. С. Метод расчета установившихся режимов электрических сетей на основе коэффициентов токораспределения// Электричество, 2010, № 11, С.23-27.

7. Ахметбаев Д.С., Ахметбаев А.Д., Бердыгожин А.С. Топологический метод формирования узловых уравнений в обращенной форме для электроэнергетических систем// Электричество. Москва. 2018, №5, С.18-27.

8. Ахметбаев Д.С., Джандигулов А.Р. 1, Ахметбаев А.Д. Топологические алгоритмы анализа и синтеза установившихся режимов электроэнергетических систем// Электричество, 2024, № 2, с. 18–30

9. Ахметбаев Д.С. 1, Джандигулов А.Р. 1, Ахметбаев А.Д. Совершенствование алгоритмов поиска деревьев направленного графа электроэнергетических систем// Электрические станции, 2024, № 2, с. 30-37.

10. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях. Ю.Н. Астахов, В.А. Веников и др. Под редакцией В.А. Веникова, М.: Энергоатомиздат, 1983, 504 с.

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ

Баймаганов А.С. *, Креслина С.Ю., Болдырева Л.П., Ергалиева Г.
НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека
Даукеева», Алматы, Казахстан
*e-mail: a.baymaganov@aues.kz

Рост доли нелинейных нагрузок в электроэнергетических системах — преобразователей частоты, источников бесперебойного питания, выпрямителей и других силовых устройств — приводит к возникновению несинусоидальных режимов. Эти режимы характеризуются искажением формы токов и напряжений, увеличением потерь, а также затруднениями при компенсации реактивной мощности [1].

В современных электроэнергетических системах применение батарей статических конденсаторов (БСК) является одним из наиболее распространённых способов компенсации реактивной мощности и повышения коэффициента мощности. Однако при работе в условиях несинусоидальных режимов расчёт параметров БСК значительно усложняется. Наличие гармонических составляющих напряжения и тока приводит к искажению режимов работы конденсаторов, повышенному нагреву, риску возникновения параллельных резонансов и сокращению срока службы оборудования [2–4].

Стандартные методики, основанные на предположении синусоидальности напряжений и токов, оказываются недостаточными. В связи с этим международные стандарты (IEEE 1459, IEEE 519) предлагают уточнённые определения мощностей и ограничения по допустимым уровням гармонических составляющих [5–6]. При расчёте БСК в таких условиях необходимо учитывать не только требуемую величину компенсации по основной гармонике, но и взаимодействие конденсаторов с гармониками высших порядков [3,7].

Рассмотрим расчёт параметров компенсирующих устройств для компенсации реактивной мощности при несинусоидальных режимах.

Нормированную функцию тока компенсирующего устройства определим как отношение мгновенных значений тока к его действующему значению

$$f_{\text{ку}} = i_{\text{ку}} / I_{\text{ку}}. \quad (1)$$

Действующее значение нормированной функции равно единице, а форма ее кривой повторяет форму кривой тока компенсирующего устройства (КУ).

Обобщенный параметр компенсирующего устройства Z_k определим по закону Ома как отношение действующих значений напряжения и тока КУ

$$Z_{\text{ку}} = \frac{U}{I_{\text{ку}}}. \quad (2)$$

Для расчёта оптимального параметра КУ используем условие оптимальной компенсации реактивной мощности при несинусоидальных режимах

$$I_{\text{ку}}^2 + \frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{н}} \cdot i_{\text{ку}} \cdot dt = 0. \quad (3)$$

При выполнении условия оптимальной компенсации достигается минимум действующего значения суммарного тока нагрузки и КУ, то есть тока в линии.

Действующее значение тока КУ представим отношением $I_{\text{ку}} = U/Z_{\text{ку}}$. Мгновенные значения тока КУ представим произведением его действующего значения и нормированной функции $i_{\text{ку}} = I_{\text{ку}} \cdot f_{\text{ку}}$. Подставим эти выражения в условие оптимальной компенсации (3) и после сокращения на $I_{\text{ку}}$ получим выражение для расчёта обобщённого параметра КУ

$$Z_{\text{ку опт}} = \frac{-U}{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{н}} \cdot f_{\text{ку}} \cdot dt}. \quad (4)$$

Одним из наиболее распространенных устройств поперечной компенсации является батарея статических конденсаторов (БСК). Мгновенные значения тока БСК при заданном напряжении определяется выражением

$$i_c = C \frac{du}{dt} = \omega C \frac{du}{d\omega t}. \quad (5)$$

Нормированная функция тока БСК

$$f_{\text{ку}} = \frac{i_{\text{ку}}}{I_{\text{ку}}} = \frac{i_c}{I_c} = \frac{du/dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{du}{dt}\right)^2 dt}}. \quad (6)$$

После подстановки этого выражения для $f_{\text{ку}}$ в (4) получим формулу расчёта обобщённого параметра БСК

$$Z_{\text{ку}} = -\frac{U \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{du}{dt}\right)^2 dt}}{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{н}} \cdot \frac{du}{dt} \cdot dt} = \frac{U}{I_{\text{ку}}}. \quad (7)$$

Чтобы получить реальный параметр КУ, то есть ёмкость БСК, подставим в (7) следующее выражение для действующего значения тока БСК

$$I_{\text{ку}} = C_{\text{ку}} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{du}{dt}\right)^2 dt}. \quad (8)$$

Из выражения (7) с учетом (8) получим расчётную формулу для оптимального значения ёмкости БСК

$$C_{\text{КУ опт}} = \frac{1}{Z_{\text{КУ}}} \frac{U}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{du}{dt} \right)^2 dt}} = - \frac{\frac{1}{T} \int_0^T i_H \cdot \frac{du}{dt} \cdot dt}{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{du}{dt} \right)^2 dt}. \quad (9)$$

Рассмотрим простой пример с аналитическими выражениями токов и напряжений, позволяющий сделать точные расчёты. Пусть к цепи на рисунке 1 приложено напряжение треугольной формы.

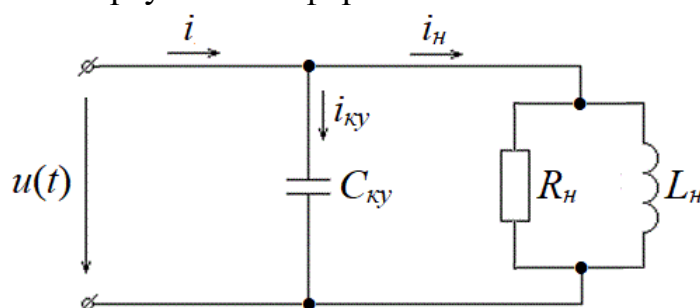


Рисунок 1. - Поперечная компенсация реактивной мощности

Ток в резисторе является активной составляющей, а ток в индуктивности – пассивной, которую надо скомпенсировать КУ заданной структуры насколько это возможно.

Аналитические выражения мгновенных значений приложенного напряжения и токов в цепи приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Наименование	Аналитические выражения на соответствующих интервалах ωt	
	$-\pi/2 \leq \omega t \leq \pi/2$	$\pi/2 \leq \omega t \leq 3\pi/2$
Напряжение, $u(t)$	$\frac{2U_m}{\pi} \omega t$	$\frac{2U_m}{\pi} (\pi - \omega t)$
Ток в резисторе, $i_a(t)$	$\frac{2U_m}{\pi \cdot R_H} \omega t$	$\frac{2U_m}{\pi \cdot R_H} (\pi - \omega t)$
Ток в индуктивности, $i_n(t)$	$\frac{U_m}{\pi \omega L_H} [(\omega t)^2 - (\pi/2)^2]$	$\frac{U_m}{\pi \omega L_H} [2\pi \omega t - (\omega t)^2 - 3(\pi/2)^2]$
Ток КУ, $i_{\text{КУ}}(t)$	$\frac{2U_m}{\pi} \omega C_{\text{КУ}}$	$-\frac{2U_m}{\pi} \omega C_{\text{КУ}}$

Для расчёта оптимального значения ёмкости БСК сначала получим аналитические выражения числителя и знаменателя расчётной формулы (9) используя соответствующие выражения из таблицы 1:

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_H \cdot \frac{du}{dt} \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_H \cdot \frac{du}{dt} \cdot dt = -\frac{U_m^2}{3 \cdot L_H}. \quad (10)$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{du}{dt} \right)^2 dt = \frac{4 \cdot \omega^2 \cdot U_m^2}{\pi^2}. \quad (11)$$

Подставим полученные выражения числителя и знаменателя в формулу (9):

$$C_{\text{КУ опт}} = \frac{U_m^2 \cdot \pi}{4 \cdot \omega^2 \cdot U_m^2 \cdot 3 \cdot L_H} = \frac{1}{\omega^2 \cdot L_H} \cdot \frac{\pi^2}{12}. \quad (12)$$

Чтобы оценить соответствие полученного значения ёмкости БСК оптимальному режиму компенсации реактивной мощности найдём аналитическое выражение зависимости действующего значения суммарного тока нагрузки и КУ I от величины ёмкости БСК. Квадрат действующего значения этого тока определяется суммой интегралов:

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{КУ}}^2 dt + \frac{1}{T} \int_0^T i_H^2 dt + \frac{2}{T} \int_0^T i_{\text{КУ}} \cdot i_H dt + \frac{1}{T} \int_0^T i_a^2 dt. \quad (13)$$

Учитывая что:

$$i = i_{\text{КУ}} + i_H + i_a, \quad (14)$$

$$\frac{2}{T} \int_0^T i_{\text{КУ}} \cdot i_a dt = \frac{1}{R_H} \cdot \frac{2}{T} \int_0^T i_{\text{КУ}} \cdot u \cdot dt = 0, \quad (15)$$

$$\frac{2}{T} \int_0^T i_H \cdot i_a dt = \frac{1}{R_H} \cdot \frac{2}{T} \int_0^T i_H \cdot u \cdot dt = 0. \quad (16)$$

После подстановки в (13) соответствующих аналитических выражений из таблицы 1 и интегрирования получим следующую сумму слагаемых:

$$I^2 = \frac{4(\omega C_{\text{КУ}} U_m)^2}{\pi^2} + \left(\frac{U_m}{\omega L_H} \right)^2 \frac{\pi^2}{30} - 2 \frac{U_m^2}{3} \cdot \frac{\omega C_{\text{КУ}}}{\omega L_H} + \frac{U_m^2}{3 R_H^2}. \quad (17)$$

Выразим величину ёмкости БСК относительно её оптимального значения

$$C_{\text{КУ}} = \psi \cdot C_{\text{КУ опт}} = \psi \cdot \frac{1}{\omega^2 \cdot L_H} \cdot \frac{\pi^2}{12}. \quad (18)$$

Построим в относительных единицах график зависимости действующего значения суммарного тока (17) от величины ёмкости БСК. За базовое значение

тока принято действующее значение тока в резисторе нагрузки, а за базовую величину ёмкости БСК принята величина оптимальной ёмкости, рассчитанная по формуле (12). Рассчитанные значения приведены в таблице 2:

Таблица 2

$\psi = C_{кв}/C_{кв\text{ опт}}$	0	0,25	0,50	0,75	0,90	1,00	1,10	1,25	1,50	2,00
I , о.е.	1,26	1,17	1,10	1,06	1,05	1,048	1,05	1,06	1,10	1,26

График зависимости действующего значения суммарного тока от величины ёмкости БСК в относительных единицах приведён на рисунке 2.

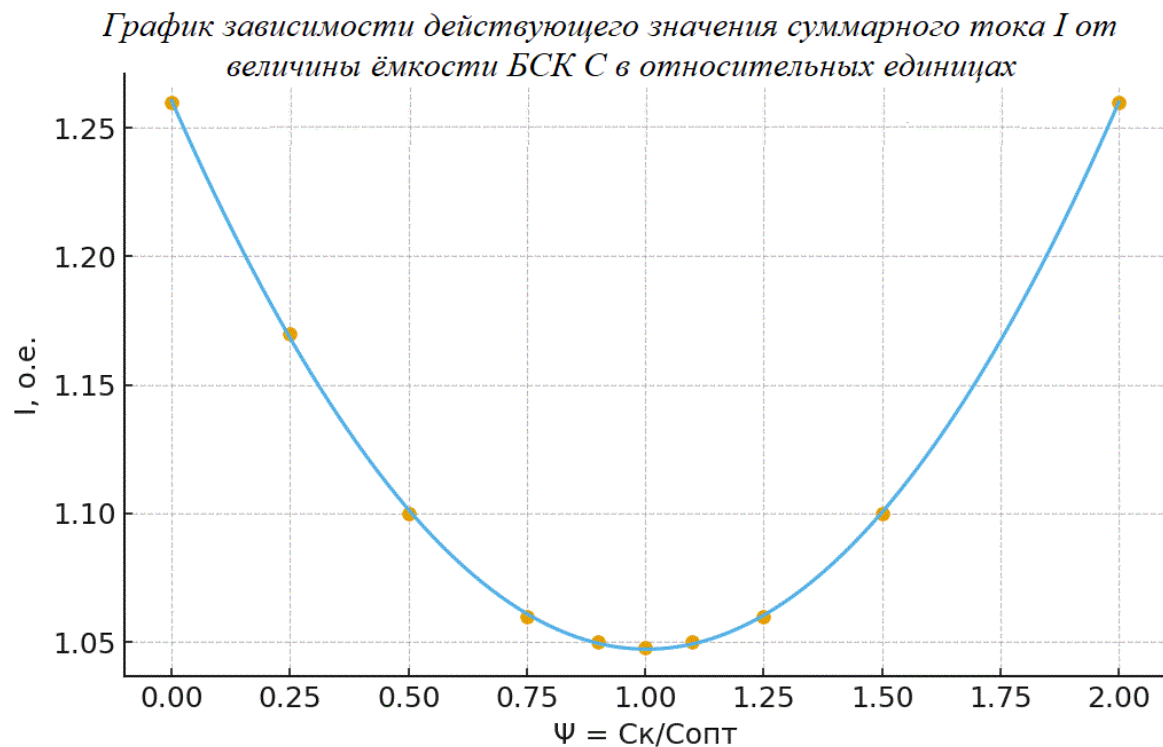


Рисунок 2.

На графике видно что максимальная компенсация реактивной мощности при несинусоидальном режиме, которой соответствует минимальное действующее значение суммарного тока КУ и нагрузки, происходит при оптимальной величине ёмкости, рассчитанной по формуле (12). Эта формула получена из условия оптимальной компенсации реактивной мощности при несинусоидальных режимах (3).

Список литературы

1. Zavalov A.A., Kuzmin S.V., Kuzmin R.S., Menshikov V.A. Reactive power compensation in electrical networks of 0.4–10 kV in cities of northern regions // *Global Energy*. – 2023.

2. Kumar N., Singh B., Panigrahi B.K. Assessment of non-sinusoidal reactive power of shunt capacitor banks in distorted voltage supply conditions. Electric Power Systems Research, 2018.
3. Herrera R.S., Salmerón P., Kim H. Harmonic disturbance identification in electrical systems with capacitor banks. Electric Power Systems Research, 2012.
4. Attachie J.C. Using a Fixed and Switched-Capacitor Bank to Investigate Harmonic Resonance. Case Studies, 2021.
5. IEEE Std 1459–2010. IEEE Standard — Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.
6. IEEE Std 519–2014. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.
7. CDE (Cornell Dubilier). Power Factor Correction Capacitors — Application and Maintenance. Technical Note, 2020.

УДК 621.314.632

ОСОБЕННОСТИ ПУСКО-ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМОВ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

**Тергемес Қ.Т., Алдибеков И.Т., Бестерекова А.Н., Даркенбаева Э.Б.,
Мұсахан Д.Ә.**

Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева
al.besterekova@aues.kz

Асинхронные двигатели (АД) во всех отраслях промышленности массовыми в применении и составляет примерно 90-95% от числа всех типов электродвигателей. В то же время пуск АД до сих пор представляют сложный характер, хотя на сегодня есть много способов их плавного пуска. Асинхронным двигателям, как с короткозамкнутым, так и с фазными роторами присущи малая управляемость и низкие динамические свойства. Малая управляемость двигателей обусловлено с невозможного изменения скорости их вращения в широком диапазоне при постоянной частоте питающей сети, а также реализации плавного пуска и точной остановки двигателей [1].

На сегодняшний день существуют достаточно широкие способы пуска асинхронных двигателей также, как [2]:

- прямой пуск;
- пуск с переключением с роторных обмоток с треугольника в звезду;
- реостатный пуск;
- пуск с тиристорными преобразователями напряжения;
- пуск с преобразователями частоты;

и способы торможения применимые к АД:

- торможение противовключением фаз статорных обмоток;
- динамическое торможение;
- торможение с несимметричным питанием статорных обмоток;
- конденсаторное торможение;
- магнитное торможение и т.д.

Выше указанные трудности пуско-тормозных режимов еще более выражены в многодвигательных электроприводах с различными механическими, электрическими связями и с нагрузками. При всех этих режимах возникают электромеханический переходный процесс, во время которого изменяется значения электрической, магнитной и кинетической энергии запасаемых в электродвигателях.

В случае всяких переходных режимах асинхронных двигателей, связанные с изменениями угловой скорости, возникают электромагнитные так и механические переходные процессы.

В многодвигательных электроприводах согласованный пуск и останов двигателей с сочлененными рабочими механизмами необходим по условиям технологических процессов, например с точки зрения сохранения качества выходной продукции. В чесальных аппаратах, синхронный пуск и синхронное торможение обеспечивают устремления обрывности или утолщения ровницы. Кроме того остановка двигателей с одинаковыми угловыми положениями роторов облегчает повторный синхронный пуск двигателей без предварительной синхронизации. В связи с этим предварительная являются синхронизация двигателей МЭП, синхронный пуск и торможения являются важными режимами работы.

В настоящее время в мировой практике модернизации промышленных производствах сложилась устойчивая тенденция внедрении регулируемых электроприводов переменного тока, базирующиеся на современных полупроводниковых средств силовой электроники с микропроцессорным управлением. При этом особое внимание уделяются применению недорогих тиристорных, транзисторных преобразователей напряжения (ТПН) и преобразователей частоты (ПЧ) для плавного, экономичного пуска двигателей [3,4].

До предварительной синхронизации перед пуском МАЭП СВ роторы электродвигателей могут находиться в произвольном положении, которые зависит от многих факторов, например разных статических моментов на валах электродвигателей. Включение в сеть двигателей, при различных положениях роторов, могут привести к несинхронному режиму их работы, и как следствие, к нарушению технологического процесса, ухудшению качества выходной продукции, и к выходу электродвигателей из строя.

Предварительная синхронизация, показаной на рисунке 1 МАЭП с ТПН осуществляется следующим образом: через встречно-параллельно включенных тириستоров двух фаз (тиристоры третьей одноименной фазы заперты) к

двигателям подается двухфазное напряжение, при этом роторы двигателей, после нескольких колебаний, устанавливаются в одинаковое положение. Подачей управляющих импульсов на тиристоры третьей фазы через несколько секунд (2-3 сек) к двигателям подаются симметричное трехфазное напряжения, и двигатели пускаются синхронно. Для плавного пуска и плавной синхронизации на СИФУ ТПН подается сигнал, изменяющий напряжение с некоторого уровня к номинальному. При этом пусковые токи двигателей посредством тиристорных преобразователей устанавливаются 2-2,5 кратного номинального значения [5].

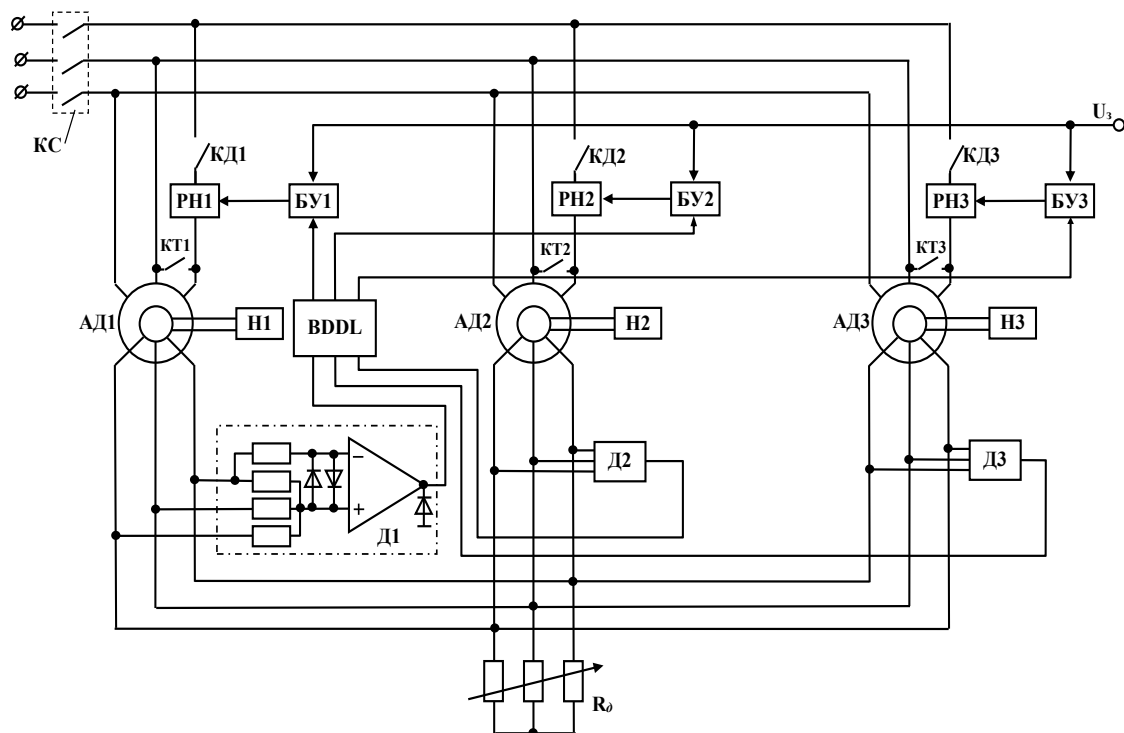


Рис. 1. - Многодвигательный асинхронный электропривод с несимметричным с тиристорным преобразователем напряжения

Торможение несимметричным питанием обмоток статоров асинхронных двигателей с фазным ротором применяется для устранения самопроизвольного реверса электропривода.

Несимметричная двухфазная система токов в обмотке статора образует два магнитных поля, вращающихся в противоположных направлениях и индуцирующих в обмотке ротора ЭДС прямой и обратной последовательностей. Индуцированные ЭДС создадут в цепи ротора две системы вторичных токов, соответствующих прямой и обратной последовательностям чередования фаз.

В результате взаимодействия магнитного потока прямого направления вращения со вторичными токами положительной последовательности образуется момент в двигательном режиме. Соответственно от взаимодействия магнитного потока обратного направления вращения с токами обратной последовательности создается момент в тормозном режиме. Результирующий момент на валу двигателя будет равен алгебраической сумме обоих моментов [6].

От взаимодействия магнитных потоков и токов противоположных систем чередования фаз будут возникать пульсирующие моменты, средняя величина которых равна нулю. В этом случае механическая характеристика в режиме несимметричного питания будет представлять собой сумму двух характеристик, одна из которых соответствует двигательному режиму, а вторая – режиму против включения.

Составление и решение уравнений механических характеристик для прямого и обратного направлений вращения магнитных полей в общем виде приводят к сложным и громоздким выражениям, которые малопригодны для практических расчетов. Поэтому для упрощения расчетов допустимо пренебречь падением напряжения в обмотке статора и принять зависимость магнитного потока от намагничивающей силы линейной. В таком случае упрощенное уравнение механической характеристики для прямого направления вращения магнитного поля будет иметь вид:

$$M_{\text{пр}(1,2,3)} = \frac{2M_{\text{кр}(1,2,3)}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}. \quad (1)$$

Соответственно для обратного направления вращения поля, когда скольжение ротора относительно поля обратной последовательности определится как $(2-s)$, уравнение механической характеристики будет:

$$M_{\text{об}(1,2,3)} = \frac{2M_{\text{кр.об}(1,2,3)}}{\frac{2-s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{2-s}}. \quad (2)$$

Результирующий момент двигателя при этом определится из выражения [7]:

$$M_{\text{рез}(1,2,3)} = \frac{2M_{\text{кр}(1,2,3)}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}} - \frac{2M_{\text{кр.об}(1,2,3)}}{\frac{2-s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{2-s}}. \quad (3)$$

где: $M_{\text{кр.пр}(1,2,3)} = M_{\text{кр}(1,2,3)} \left(\frac{U_{\text{пр}}}{U_{\text{ф.ном}}} \right)^2$ и $M_{\text{кр.об}(1,2,3)} = M_{\text{кр}(1,2,3)} \left(\frac{U_{\text{пр}}}{U_{\text{ф.ном}}} \right)$.

$M_{\text{кр}(1,2,3)}, s_{\text{кр}}$ - критический момент и критическое скольжение при симметричном питании двигателей.

Вид результирующей механической характеристики в режиме несимметричного питания будет определяться в основном значением $s_{\text{кр}}$, которое в свою очередь зависит от величины активного сопротивления в цепи ротора R_p .

Для обеспечения тормозного режима при скольжениях от $s = 0$ до $s = 1$ необходимо в общую цепь роторов включать активное сопротивление r_b такой величины, чтобы $s_{\text{кр}}$ удовлетворялось следующее неравенство:

$$s_{кр} = \frac{r'_p + r'_B}{\sqrt{r_c^2 + x_{к.з}^2}} \geq 1. \quad (4)$$

Наиболее эффективный режим торможения будет иметь место при условии, когда $s_{кр}=2$, что является следствием преобразования производной от $M_{рез}$ по $s_{кр}$, если эту производную приравнять нулю.

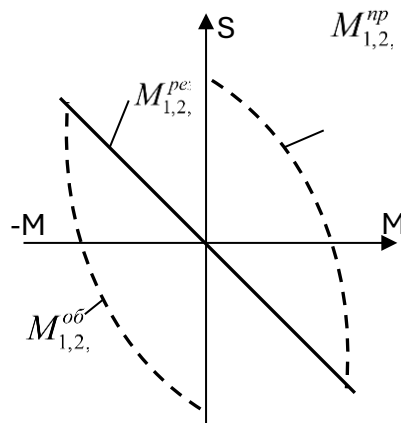
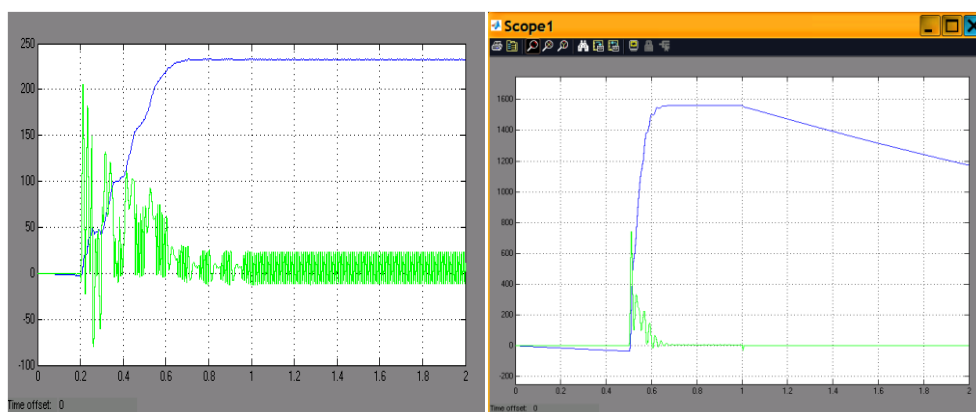


Рис. 2. – Механическая характеристика двигателей ленточного конвейера при несимметричном питании обмоток статора.

Таким образом, результирующие механические характеристики асинхронного двигателя в режиме торможения при $s_{кр} < 2$ имеют криволинейный характер, а при $s_{кр} > 2$ они практически прямолинейны и подобны характеристикам двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, уступая им в величине максимального момента.



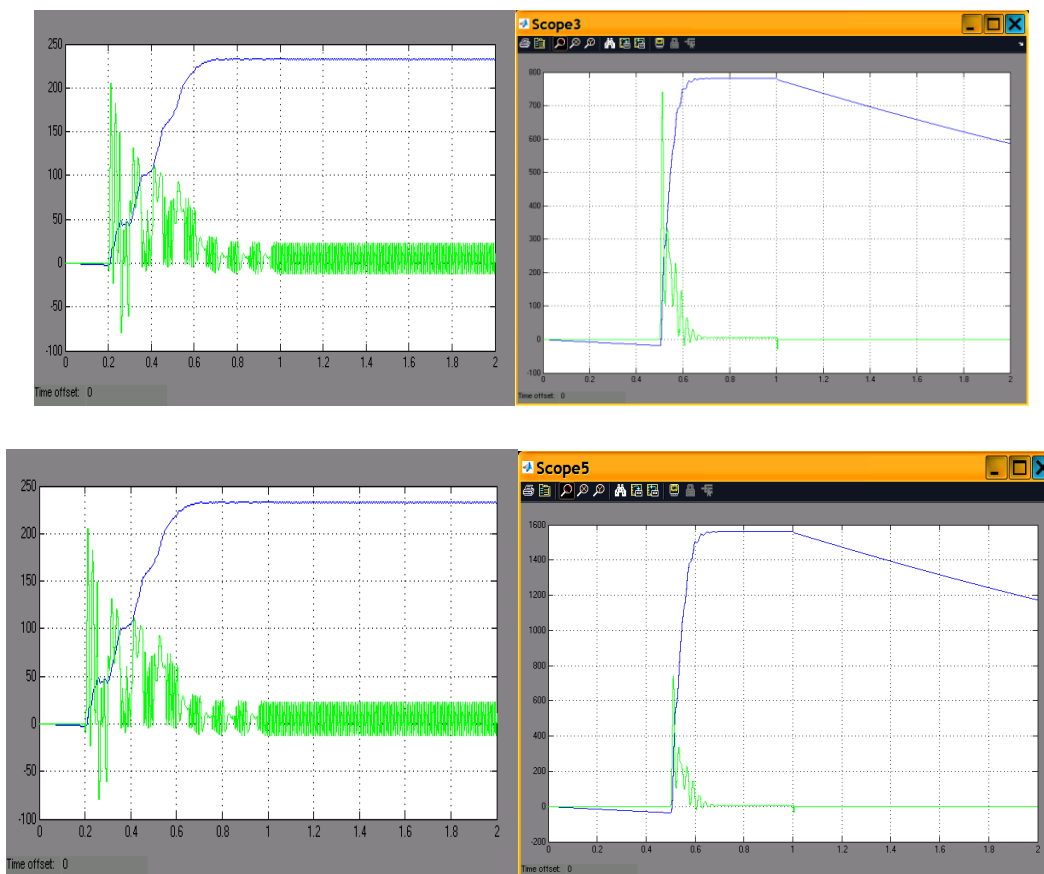


Рис. 3. - Осциллограммы пуско-тормозных режимов при несимметричном питаний

В МАЭП с ТПН торможение несимметричным питанием достигается запиранием встречно-параллельно включенных тиристоров одноименной фазы и подачей управляющих импульсов на встречно-параллельно включенных тиристоров соединенных с третьей фазы на одноименным остальным фазам. При этом на три обмотки статоров одновременно подаются симметричное, регулируемое по амплитуде, двухфазное напряжение, двигатели МАЭП с ТПН будут останавливаться синхронно. Осциллограммы пуско-тормозных режимов при несимметричном питаний показаны на рисунке 2.

Список литературы:

1. Петров, Л. П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей Л. П. Петров. — М.: Энергоиздат, 1981. — 184с.
2. Копылов, И. П. Электрические машины : учебник для вузов / И. П. Копылов. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 669 с.
3. И.Я.Браславский, 3.Ш.Ишматов, В.Н.Поляков. Под ред. И.Я.Браславского. — М.: Академия, 2004. — 256 с
4. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».– Иваново, 2008. 298 с.

5. Браславский И. Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. М.: Энергоатомиздат, 1988. 167 с

6. Курилин, Сергей Павлович Развитие теории несимметричных режимов и энергетических процессов асинхронных двигателей сельскохозяйственных электроустановок, автореферат докторской диссертаций 05.02.20.

УДК 621.3.051.025

ТӨМЕН КЕРНЕУЛІ АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРДЫҢ ОРЫНБАСУ СХЕМАСЫ ПАРАМЕТРЛЕРІ МЕН ІСКЕ ҚОСУ СИПАТТАМАЛАРЫН ЕСЕПТЕУДІҢ ЖАҢА ӘДІСТЕМЕСІ

Заур А.Т., Шыныбай Ж.С.

Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан

e-mail: aidyn.zaur@gmail.com

Асинхронды қозғалтқыштардың өтпелі үдерістерін зерттеу электр жетектерінің сенімділігі мен тиімділігін арттыруда маңызды рөл атқарады. Қазіргі таңда, төмен вольтты асинхронды қозғалтқыштардың өтпелі үдерістерін талдаудың қажеттілігі артып келеді, өйткені өндірістік кәсіпорындарда қарапайым тұрақталған режимдерді есептеу кезінде де нақты деректерде айтарлықтай алшақтықтар байқалады. Осыған байланысты, асинхронды қозғалтқыштың орынбасу сұлбасына негізделген есептеу әдістерін қолдану өзектілігін жоғалтқан жоқ.

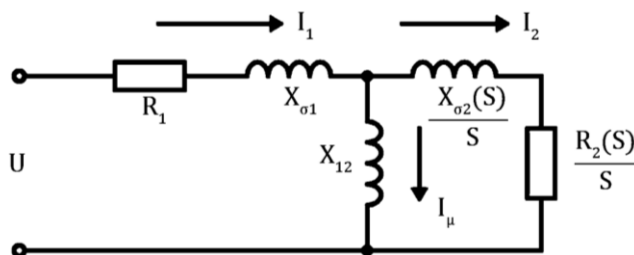
Асинхронды қозғалтқыштың негізгі өтпелі процестерін сипаттау үшін оның орынбасу сұлбасы қолданылады (1-сурет) [1]. Бұл сұлбаның ерекшелігі статордың орамының активті кедергісі ескерілген және ротордың активті және индуктивті кедергілері сырғу коэффициентінен тәуелді өзгеретінін көрсетеді.

Бұл зерттеуде төмен вольтты асинхронды қозғалтқыштардың іске қосу және жұмыс істеу сипаттамаларын анықтауға арналған алгоритм ұсынылады. Алгоритм бес бейсызықты теңдеулер жүйесінен тұрады және негізгі параметрлерді есептеуге бағытталған. Олар:

- Іске қосу моменті, M_{II} ;
- Номиналды момент, M_H ;
- Максимальды момент, M_M ;
- Номиналды реактивті қуат, Q_H ;
- Іске қосу тогы, I_{II} .

Қысқа тұйықталған роторлы асинхронды қозғалтқыштарда (АҚ), кернеуі 1000 вольтқа дейін болған жағдайда, токтың ығысу әсерін ескеру қажет. Бұл әсер параметрлер мен іске қосу сипаттамаларын есептеуді едәуір қиындатады. Ал орынбасу сұлбасында статор орамасының активті кедергісі де ескеріледі (1-

сурет). Ротордағы токтың ығысу дәрежесі негізінен ондағы индукцияланатын токтардың жиілігіне, яғни ротордың сырғу коэффициентіне тәуелді. Массивті ротор теориясына сәйкес, ондағы токтың ығысу әсері ротордың сырғу коэффициентіне тәуелді активті кедергінің R_2 және шашыраңқы индуктивтік кедергінің $x_{\sigma 2}$ өзгеруіне әкеледі [1].



1-сурет. 1000 В-қа дейінгі қысқа тұйықталған роторлы АҚ-ның алмастыру сұлбасы

Ротор орамасының кедергілерінің өзгерісін жеткілікті дәлдікпен келесі тәуелділіктер арқылы сипаттауға болады:

$$R_2 = R_{2c} + (R_{2n} - R_{2c})\sqrt{s}$$

$$X_{\sigma 2} = \frac{X_{\sigma 2n} * X_{\sigma 2c}}{X_{\sigma 2n} + (X_{\sigma 2c} - X_{\sigma 2n})\sqrt{s}} \quad (1)$$

$$= \frac{k * X_{\sigma 2n}}{1 + (k - 1)\sqrt{s}}$$

мұндағы R_{2c} , R_{2n} , $x_{\sigma 2c}$, $x_{\sigma 2n}$ - синхронды ($s=0$) және іске қосу ($s=1$) режимдерінде сәйкесінше ротор орамасының активті және индуктивті жылу шығын кедергісі.

Ротор орамасының кедергілері сырғу коэффициентіне тәуелді болғандықтан, қозғалтқыштың бірқатар басқа параметрлері де соған тәуелді болады. Атап айтқанда:

- асқын өтпелі индуктивті кедергісі x'' ;
- статор орамасы ашық және қысқа тұйықталған кезде ротор орамасының индуктивті кедергілері x_2 , x'_2 ;
- статор орамасы ашық және қысқа тұйықталған кезде ротор орамасының электромагниттік уақыт тұрақтылары T_2 , T'_2 деген АҚ-дағы өтпелі процестерді есептеу үшін қажетті шамалар тұрақты емес. Сондықтан, осы параметрлерді есептегенде, олар есептелген қозғалтқыш режимі көрсетілуі керек.

1000 В-қа дейінгі қысқа тұйықталған роторы бар АҚ-тың эквивалентті сұлбасында статор орамасының активті кедергісі ескеріледі. Оны ескермесе, қозғалтқышты іске қосу режимінде желіден тұтынылатын активті қуатты, токты және электромагниттік моментті анықтауда қателіктер жіберілуі мүмкін. Статор орамасындағы шығындар номиналды режимдегі жалпы активті қуат

шығындарының салыстырмалы түрде тұрақты бөлігін (орта есеппен 0,3) құрайды, сондықтан

$$R_{\Sigma} = 0,3(1 - \eta_H) \cos \varphi_H \quad (2)$$

АҚ-тың эквивалентті сұлбасы сырғанаудың толық ауқымында ($s=0$ -ден $s=1$ -ге дейін) нақты процестерге жеткілікті дәрежеде сәйкес болуы керек және практикалық қолдануға мүмкіндігінше қарапайым болуы керек. Қысқа тұйықталған роторы бар АҚ-тың белгілі эквивалентті сұлбасы күрделілігіне және анықтауы қиын бірқатар конструктивтік параметрлерді қажет ететініне байланысты АҚ режимдерін жаппай есептеуге онша қолайлы емес.

Қысқа тұйықталған роторы бар АҚ үшін ықшамдалған эквивалентті сұлба (1-сурет) аталған ерекшеліктер ескеріле отырып таңдалған.

Негізгі есептік параметрлер – эквивалентті сұлбадан (1-сурет) алынатын қозғалтқыштың келесі жинақталған параметрлері:

1. синхронды индуктивті кедергі

$$X_{\Sigma} = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2} \quad (3)$$

1. ротор орамының индуктивті кедергі

$$X_{\sigma 2}(s) = X_{\sigma 2}(s) + X_{\sigma 1} \quad (4)$$

1. асқынөтпелі индуктивті кедергі

$$X''(s) = X_{\sigma 1} + \frac{X_{\sigma 2} * X_{\sigma 1}(s)}{X_{\sigma 2} + X_{\sigma 1}(s)} \quad (5)$$

1. статор орамы қысқа тұйықталған кездегі ротор орамының индуктивті кедергі

$$X'_{\sigma 2}(s) = X_{\sigma 2}(s) + \frac{X_{\sigma 1} * X_{\sigma 2}(s)}{X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}(s)} \quad (6)$$

1. статор орамы қысқа тұйықталған кездегі орамының электромагниттік уақыт тұрақтысы

$$T'_2(s) = \frac{X'_{\sigma 2}(s)}{R_2(s)} \quad (7)$$

Қысқа тұйықталған роторы бар АҚ орынбасу сұлбасының параметрлерін және іске қосу сипаттамаларын есептеу үшін бастапқы деректер ретінде келесілер қолданылады:

- қозғалтқыш білігіндегі номинальды активті қуат P_H ;
- номинальды қуат коэффициенті $\cos \varphi_H$;
- номинальды режимдегі қозғалтқыштың ПӘК және сырғуы – сәйкесінше η_H және s_H ;
- іске қосу тогының, іске қосу моментінің және максималды моменттің еселіктері – сәйкесінше I_H , M_H и M_M .

Қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды қозғалтқыштың (АҚ) орынбасу сұлбасының параметрлері мен іске қосу сипаттамалары келесі тәртіппен есептеледі:

Қысқа тұйықталған роторы бар АҚ-тың негізгі режим параметрлері, орынбасу сұлбасы параметрлері мен бұрмалау арасындағы байланыс қатынасынан мынаны аламыз:

1. Іске қосу моменті

$$M_{II} = \frac{I}{\cos(\varphi_H \eta_H)} \left\{ \operatorname{Re} \left[\frac{I}{\hat{Z}(s=I)} \right] - I_{II}^2 R_I \right\} \quad (8)$$

2. Номинал момент

$$M_H = \frac{I}{\cos(\varphi_H \eta_H)} \left\{ \operatorname{Re} \left[\frac{I}{\hat{Z}(s=S_H)} \right] - I_H^2 R_I \right\} \quad (9)$$

3. Максимал момент

$$M_M = \frac{I}{\cos(\varphi_H \eta_H)} \left\{ \operatorname{Re} \left[\frac{I}{\hat{Z}(s=S_{kp})} \right] - I_{KP}^2 R_I \right\} \quad (10)$$

4. Номиналды реактивті қуат

$$Q_H = \sin \varphi_H = \operatorname{Im} \left[\frac{I}{\hat{Z}(s=S_H)} \right] \quad (11)$$

5. Іске қосу тогы

$$I_{II} = \left[\frac{I}{\hat{Z}(s=I)} \right] \quad (12)$$

Мұнда $Z(s)$ – сырғу s кезіндегі АҚ кірістік кешенді кедергісі. Орынбасу сұлбасына сәйкес

$$\hat{Z} = R_I + jx_{\sigma I} + \left[\frac{I}{jx_{l2}} + \frac{I}{R_2(s)/s + jx_{\sigma 2}(s)} \right]^{-1} \quad (13)$$

Мұнда $Z(s)$ - кірістік кешенді кедергінің жұптасқан мәні.

(8-12) формулаларды x_{l2} , $x_{\sigma 1}$, $x_{\sigma 2п}$, $R_{2с}$, $R_{2п}$ орынбасу сұлбасының параметрлері бойынша 5 сызықтық емес алгебралық теңдеулер жүйесі ретінде қарастыруға болады. Бұл жүйе итерациялық процестің жинақтылығын жеделдету арқылы Гаусс-Зейдель әдісімен шешіледі. Орынбасу сұлбасының

параметрлері анықталғаннан кейін, (3-7) өрнектері бойынша қозғалтқыштың қалған жалпыланған параметрлері есептеледі. Содан кейін (8-12) формулалары арқылы іске қосу сипаттамалары есептеледі.

Келтірілген алгоритмнен көрініп тұрғандай, қысқа тұйықталған роторы бар АҚ параметрлерін есептеу жеткілікті күрделі, сондықтан бұл операцияларда ЭЕМ қолданған орынды.

Алгоритм негізінде Python бағдарламалау тілінде арнайы бағдарламалық жасақтама әзірленеді. Бұл бағдарлама пайдаланушыға қозғалтқыштың негізгі параметрлерін енгізу арқылы жоғарыда аталған сипаттамаларды есептеуге мүмкіндік береді. Бағдарламаның нәтижелері қозғалтқыштың сырғанау коэффициентіне тәуелділігін сипаттайтын графиктер түрінде визуализацияланады. Бұл қозғалтқыштың жұмыс істеу режимдерін тереңірек талдауға және өндірістік қолданыстағы есептеулерді нақтылауға көмектеседі.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы – әзірленген бағдарламалық жасақтаманың өндірістік кәсіпорындарда, жобалау ұйымдарында және ғылыми-зерттеу орталықтарында қолданылу мүмкіндігі. Бұл әдіс қозғалтқыштың жұмыс істеу параметрлерін дәл анықтауға, электр жетегінің тұрақтылығын арттыруға және энергия тиімділігін жоғарылатуға ықпал етеді.

Әдебиеттер

1. Гамазин С. И., Садыкбеков Т. А. Пуск электрических двигателей. – Алматы: Ғылым, 1992. – 231.

УДК 621.316.925

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ 6-35 КВ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

**Кузнецов В.А., Дмитриченко В.И., Башкиров М.В., Жагыпаров Е.Н.,
Жагыпарова М.Х.**

Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы,
Казахстан

Введение

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются наиболее распространённым видом повреждений в распределительных электрических сетях 6–35 кВ. Их доля достигает 65–80 % от всех аварийных ситуаций, и они оказывают существенное влияние на надёжность электроснабжения. При этом существующие методы релейной защиты имеют ряд ограничений: недостаточную чувствительность, длительное время срабатывания, высокую вероятность отказов при переходных сопротивлениях, а также генерацию

коммутационных перенапряжений, опасных для оборудования с ослабленной изоляцией.

Таким образом, актуальной задачей является разработка усовершенствованного способа и устройства релейной защиты от ОЗЗ, обеспечивающих повышение быстродействия, надёжности и безопасности работы распределительных электрических сетей.

1 Анализ существующих решений

На сегодняшний день применяются различные методы: компенсация ёмкостного тока дугогасящими реакторами [1], определение гармонических составляющих токов нулевой последовательности [2], использование заземляющих резисторов [3], а также кратковременное низкоомное индуктивное заземление нейтрали [4]. Каждый из этих способов имеет определённые преимущества, однако при практической эксплуатации выявляются существенные недостатки, которые снижают эффективность защиты и ограничивают область применения.

Дугогасящие реакторы (ДГР). Основная их функция — компенсация ёмкостного тока сети.

Недостатки:

- временная инерционность порядка 2–3 периодов (40–60 мс), вследствие чего компенсация осуществляется не мгновенно, а с задержкой;
- в этот интервал времени в сети возникают наиболее опасные перенапряжения и переходные процессы;
- высокая стоимость и значительные габариты, а также необходимость автоматической подстройки под изменяющуюся ёмкость сети.

По этим причинам применение ДГР в нашем устройстве нецелесообразно. Устройства с нейтралеобразующим трансформатором. Наиболее близким по технической сущности решением является использование нейтралеобразующего трансформатора, подключаемого к сети через высоковольтный выключатель. В таких схемах реализуется метод кратковременного низкоомного индуктивного заземления нейтрали [4]. Суть работы заключается в том, что при появлении ОЗЗ высоковольтный выключатель подключает нейтралеобразующий трансформатор к сети, и в повреждённой фазе протекает индуктивный ток, достаточный для срабатывания максимальной токовой защиты (МТЗ).

Недостатки:

- низкая чувствительность и высокая вероятность отказов в срабатывании релейной максимальной токовой защиты в условиях наличия переходного сопротивления в месте замыкания на землю;
- генерация в электрическую сеть при ОЗЗ индуктивного тока высоких значений (более 300 А), что создает значительные коммутационные перенапряжения (до $7U_{\phi}$);

- длительная задержка включения нейтралеобразующего трансформатора при появлении ОЗЗ, во время которой возникают наиболее опасные перенапряжения и высшие гармоники тока (ВГ);
- зависимость от трансформаторов напряжения, которые подвержены повреждениям.

По этой причине в предлагаемом устройстве отказались от применения подобной схемы. Вместо режима «перекомпенсированного тока» для пуска МТЗ реализован принцип регулируемого тока через симисторный регулятор, который подаёт сигнал на защиту от замыкания на землю (ЗНЗ). В зависимости от выбранной логики работы ЗНЗ может быть реализована либо только в виде выдачи сигнала, либо в виде автоматического отключения повреждённого присоединения.

Таким образом, предлагаемый способ отличается от известных решений тем, что обеспечивает селективную реакцию на замыкание на землю с возможностью выбора действия — либо отключение, либо выдача предупредительного сигнала.

2 Предлагаемый способ и устройство

Разработанное устройство предусматривает использование нейтралеобразующего трансформатора, RC-гасителя и симисторного регулятора тока. Электрическая схема устройство представлена на рисунке 1.

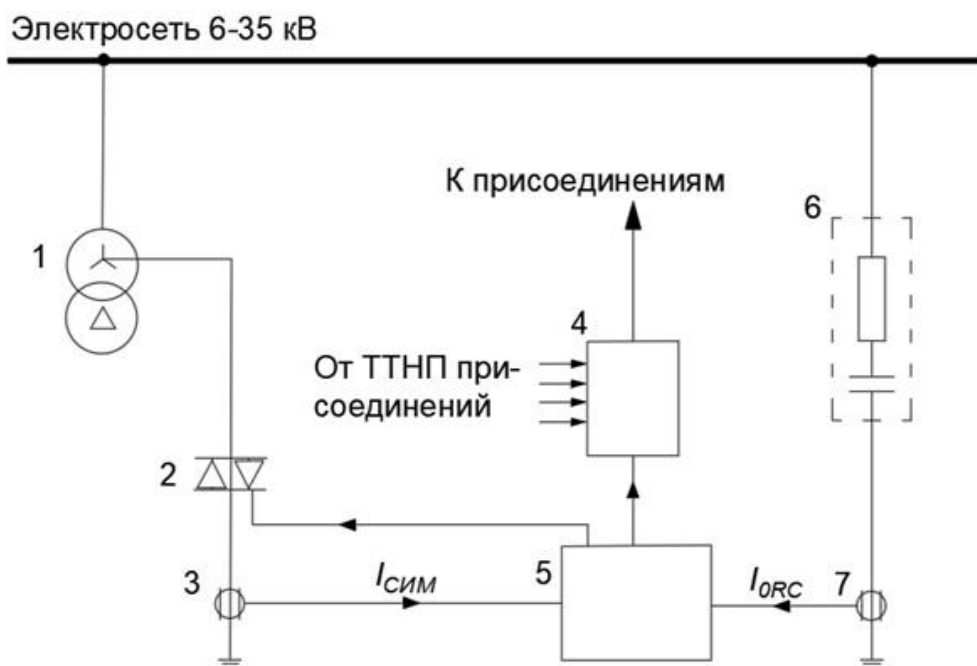


Рис. 1. – Электрическая схема устройство релейной защиты

1-нейтраль образующий трансформатор, 2-симисторный регулятор тока, 3,7- трансформатор тока нулевой последовательности, 4- блок релейной защиты от однофазных замыканий на землю, 5- блок управления устройством, 6- RC-гасителя

Принцип действия заключается в следующем:

- при возникновении ОЗЗ RC-гаситель формирует сигнал I_{ORC} , поступающий на блок управления устройством;
- сигнал открывает симисторный регулятор тока, который пропускает в сеть индуктивный ток от нейтралеобразующего трансформатора;
- ток регулируется в пределах условия:

$$I_{OЗЗ} < I_{СИМ} < I_{МТЗ},$$

где: $I_{OЗЗ}$ - минимальный ток срабатывания релейной защиты от однофазных замыканий на землю из всех отходящих присоединений; $I_{СИМ}$ – ток от регулятора тока; $I_{МТЗ}$ - минимальный ток срабатывания максимальной токовой защиты из всех отходящих присоединений.

В нормальном режиме регулятор тока закрыт, RC-гаситель подключен к сети и находится в готовности. При длительных ОЗЗ осуществляется компенсация ёмкостного тока посредством регулировки индуктивного тока с задержкой не менее 0,1 с, что позволяет безопасно поддерживать работу сети.

3 Экспериментальные исследования и моделирование

Для подтверждения работоспособности предложенного способа релейной защиты было проведено моделирование в среде Matlab/Simulink.

Модель сети включала питающий трансформатор 110/10 кВ, кабельные линии с суммарной ёмкостью 10 мкФ, заземляющий трансформатор мощностью 63 кВА, RC-гаситель и тиристорный заземлитель нейтрали. В модели рассматривались режимы: нормальный, режим ОЗЗ без RC-гасителя и режим ОЗЗ с RC-гасителем. Модель приложена на рисунке 2.

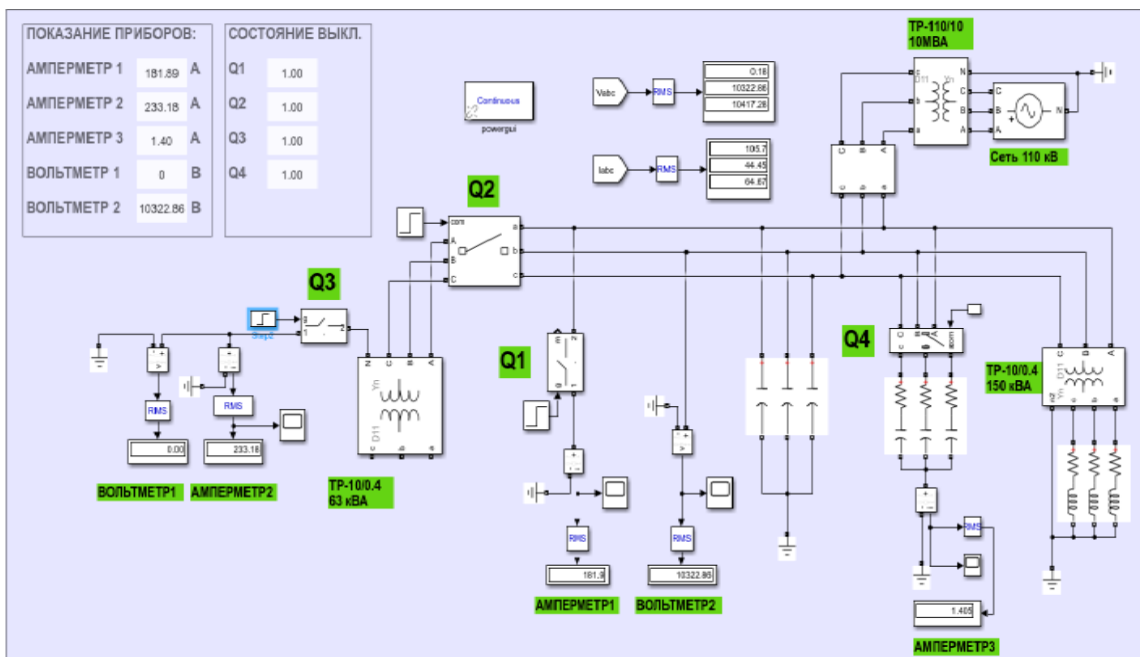


Рис. 2. – Модель электрической сети 6-35 кВ

По результатам моделирования установлено:

- ток однофазного замыкания при ёмкости сети 10 мкФ составляет $\approx 59\text{--}60$ А;
- использование RC-гасителя снижает амплитуду высших гармоник на 20–30 % в переходном режиме и на 2–4 % в установившемся режиме;
- при подключении заземляющего трансформатора мощностью 63 кВА ток в нейтрали достигает ≈ 250 А, что обеспечивает срабатывание токовых защит;
- схема с постоянным подключением трансформатора показала более высокую эффективность по снижению гармонических искажений.

Эксперименты на лабораторном стенде подтвердили полученные результаты: зарегистрированные осциллограммы токов и напряжений показали снижение коммутационных перенапряжений и повышение чувствительности защиты при использовании RC-гасителя.

Таким образом, моделирование и практические испытания подтвердили эффективность предложенного устройства и возможность его применения в распределительных сетях 6–35 кВ.

4 Преимущества и новизна

По сравнению с устройствами предлагаемое решение обладает следующими преимуществами:

1. Повышенное быстродействие – включение нейтралеобразующего трансформатора осуществляется мгновенно по сигналу от RC-гасителя, а не от трансформатора напряжения.
2. Надёжность при переходных сопротивлениях – регулировка тока позволяет обеспечить срабатывание защиты даже при значительном сопротивлении в месте замыкания.
3. Снижение коммутационных перенапряжений – RC-гаситель ограничивает перенапряжения при операциях включения/отключения.
4. Расширение области применения – устройство эффективно как в сетях с изолированной, так и с компенсированной нейтралью.
5. Простота внедрения – конструкция использует серийно выпускаемые симисторы, трансформаторы тока нулевой последовательности и стандартные элементы релейной защиты.

Заключение

Предложенный способ и устройство релейной защиты распределительных электрических сетей от однофазных замыканий на землю обеспечивают повышение надёжности и безопасности электроснабжения. Использование RC-гасителя и симисторного регулятора тока позволяет минимизировать коммутационные перенапряжения, ускорить срабатывание защиты и повысить её чувствительность. Это делает систему перспективной для широкого применения в распределительных сетях 6–35 кВ, включая сети с ослабленной изоляцией и повышенными требованиями к надёжности.

Список литературы

1. Фишман В. Регулирование режима заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ // Новости ЭлектроТехники. – 2012. – №5 (77).
2. RU Патент №2 675 623 С1. Устройство защиты от однофазных замыканий на землю. – 2018.
3. RU Патент №2 454 769. Устройство заземления нейтрали трёхфазной электрической сети. – 2012.
4. Кужеков С.Л., Хнычев В.А. Предотвращение множественных повреждений КЛ 6–10 кВ с помощью кратковременного низкоомного индуктивного заземления нейтрали // Новости ЭлектроТехники. – 2010. – №4 (64).
5. Абрамович Б., Кабанов С., Сергеев А. Перенапряжения и электромагнитная совместимость оборудования электрических сетей 6–35 кВ // Новости ЭлектроТехники. – 2002. – №5 (17).

УДК 621.311

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБЪЕДИНЕНИЯ ЗАПАДНОЙ ЭНЕРГОЗОНЫ С ЕЭС РК

Саурамбаев А.*, Михалкова Е.Г.

Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы,
Казахстан

*e-mail: asaurambaev@mail.ru, e.mikhalkova@auces.kz

Введение

Одной из отличительных черт Единой энергетической системы Республики Казахстан является раздельное функционирование ее зон. Западная энергосистема работает изолированно, не имея связей с северными и южными сетями. В таких условиях особую важность приобрел вопрос повышения надёжности электроснабжения Западного региона. В ответ на это разработан проект «Объединение энергосистемы Западного Казахстана с ЕЭС Казахстана», предусматривающий строительство линии электропередачи 500 кВ протяжённостью 604,3 км, связывающую подстанции «Карабатан» и «Ульке» [1]. Реализация проекта (2021-2027 гг.) направлена на повышение надёжности сетей Западного региона, а также на привлечение маневренной генерации для компенсации возможных дисбалансов. Помимо этого решения, обсуждаются и перспективы применения передачи постоянного тока (ППТ) для межрегиональной передачи энергии, учитывая их преимущества на больших расстояниях.

Основной текст

Мировые тенденции свидетельствуют о всё более широком использовании ППТ для соединения разрозненных энергосистем и интеграции удаленных источников генерации. Международные исследования отмечают, что ППТ технически и экономически выгоднее ЛЭП переменного тока на дистанциях свыше 300–800 км [2]. В частности, проект SunZia в США (3 000 МВт ветровой генерации) планирует использовать ППТ для передачи энергии на расстояние около 900 км [3]. Подобные технологии уже связывают различные регионы мира и способствуют интеграции ВИЭ. Наряду с этим Казахстан активно расширяет возобновляемую генерацию. К началу 2025 года в стране создано 153 объекта ВИЭ общей мощностью около 3 032 МВт [4]. В западных областях также реализуются «зеленые» проекты: запланировано строительство ветро- и солнечных электростанций суммарной мощностью 80 МВт [5]. Рост доли ВИЭ предъявляет новые требования к гибкости и надежности энергосистемы, что подчеркивает актуальность изучения передовых технологий передачи электроэнергии и обеспечения устойчивой работы сетей. В связи с этим возникает необходимость исследование эффективности применения ППТ для объединения двух частей энергосистемы. В работе предполагается исследовать эффективность путем сравнения двух технологий передачи электрической энергии: сравнить возможность передачи на постоянном и переменном токе.

Рассматриваемый участок работ располагается в Атырауской и Актыбинской областях РК. Административные центры – г. Атырау и г. Актобе. Районы реализации проектируемого строительства:

- Атырауская область (Кызылкогинский и Макатский районы);
- Актыбинская область (Байганинский, Темирский, Мугалджарский, Алгинский районы).

На рисунке 1 представлена карта-схема с предложенными вариантами объединения Западных МЭС с ЕЭС Казахстана. Рассматриваемый участок включает в себя электрические сети Актыбинских и Западных МЭС РК и ОЭС Урала и Средней Волги РФ. Участок состоит из:

- 1 электрической станции;
- 19 подстанций, 8 из которых на напряжение 500 кВ, 11 на напряжение 220 кВ;
- 32 ЛЭП общей протяженностью 4590,684 км (без учета проектируемой ЛЭП).

Для возможности осуществления передачи на переменном токе, то есть строительства ВЛ 500 кВ соединяющую ПС Ульке и ПС Карабатан необходимо:

- Проектирование ВЛ 500 кВ «Ульке-Карабатан» мощностью 1000 МВт, вдоль автомобильной дороги Атырау-Актобе, до проектируемой ячейки на ПС Ульке. Планируется выполнить ВЛ проводом марки 3×АС-300/66.

- Проектирование открытого распределительного устройства 500 кВ «Карабатан» на 6 ячеек. Предполагается установка одной основной и одной резервной группы однофазных автотрансформаторов АОДЦТН 167000/500/220, одной группы однофазных шунтирующих реакторов РОДЦ 60000/500У1 и управляемого шунтирующего реактора РШТУ-180000/500-УХЛ1.

- Расширение ОРУ 220 кВ ПС «Карабатан» на одну линейную ячейку;

- Расширение ОРУ 220 кВ ПС «Ульке» на одну линейную ячейку;

- Расширение ОРУ 500 кВ ПС «Ульке» на 5 ячеек с установкой 1 группы АТ-500/220/10.

Для осуществления передачи на постоянном токе необходимо реализовать вышеперечисленные технические решения для стороны переменного тока и выполнить следующее:

- Проектирование конверторной станции ± 500 кВ «Карабатан-Ульке». Предполагается выполнить преобразовательные блоки на базе модульных многоуровневых преобразователей напряжения (ММПН). На рисунке 3 представлена упрощенная однолинейная схема преобразовательной подстанции с применением ММПН [6].

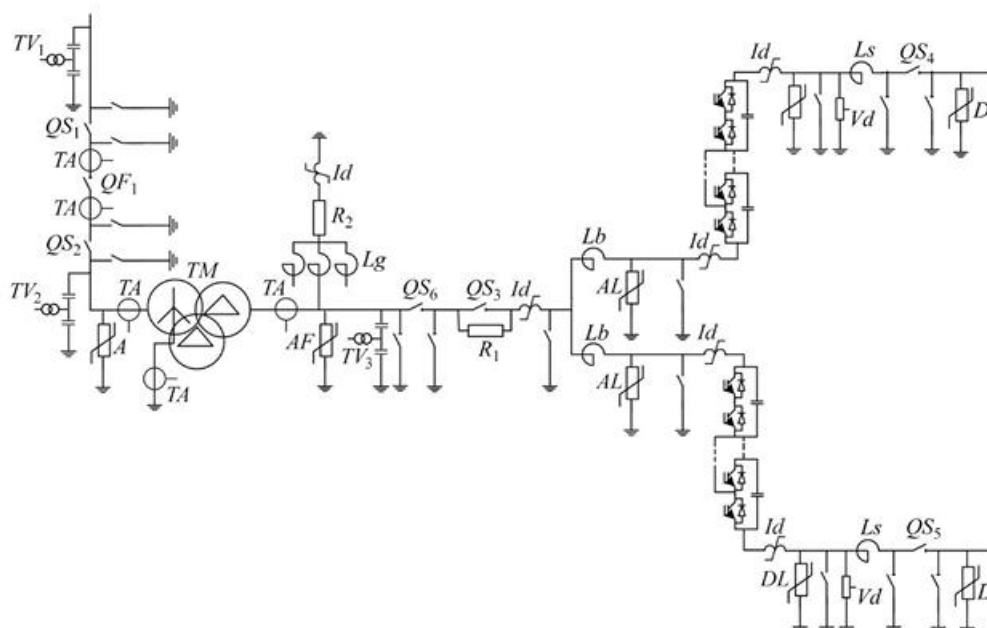


Рис. 3. – Упрощенная однолинейная схема преобразовательной подстанции с применением ММПН

Мощность, передаваемая одним блоком составит 500 МВт. Преобразовательная подстанция на стороне ПС «Карабатан» будет иметь

отрицательную полярность, а на стороне ПС «Ульке» положительную полярность. Предполагается заземление каждой из ППТ.

– Сооружение биполярной ВЛ ± 500 кВ постоянного тока мощностью 1000 МВт. ВЛ ППТ планируется выполнить проводом марки АС-600/72.

Заключение

В работе были разработаны технические решения для анализа условий и перспектив объединения Западной энергосзоны с ЕЭС РК, что является важной задачей энергетики Казахстана. Исследование сфокусировано на сравнительном анализе двух подходов к передаче электроэнергии: на переменном токе и с использованием передачи постоянного тока.

Для передачи на переменном токе необходимо ряд технических решений, предусматривающих строительство воздушной линии «Ульке-Карабатан» и комплекса мероприятий по проектированию и расширению открытых распределительных устройств на подстанциях «Карабатан» и «Ульке». При этом технические решения для постоянного тока получаются более объемные, т.к., помимо полной реализации технических решений для стороны переменного тока, они включают в себя проектирование конверторной станции «Карабатан-Ульке» на базе модульных многоуровневых преобразователей напряжения и сооружение биполярной ВЛ постоянного тока.

В качестве последующего этапа для исследования необходимо произвести расчет режимов работы и технико-экономическое сравнение вариантов передачи электроэнергии.

Список литературы

1. Проект Объединение энергосистемы Западного Казахстана с ЕЭС Казахстана [Электронный ресурс] // Казахстанская компания по управлению электрическими сетями. URL: <https://www.kegoc.kz/ru/about/investicionnye-proekty/155662/#:~:text=1,604%2C3%20%D0%BA%D0%BC>. (Дата обращения 11.09.25).

2. Alassi, A., Bañales, S., Ellabban, O., Adam, G., MacIver, C. HVDC Transmission: Technology Review, Market Trends and Future Outlook. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – p. 530-544.

3. Electrifying our grids: The role of HVDC technology [Электронный ресурс] // Stantec. URL: <https://www.stantec.com/en/ideas/topic/stantec-era/electrifying-our-grids-role-hvdc-technology#:~:text=HVDC%20technology%20allows%20our%20grids,operating%20at%20different%20AC%20frequencies>. (Дата обращения 11.09.25).

4. Kazakhstan Showcases Renewable Energy Vision at IRENA Assembly in Abu Dhabi [Электронный ресурс] // The Astana Times. URL: <https://astanatimes.com/2025/01/kazakhstan-showcases-renewable-energy-vision-at-irena-assembly-in-abi-dhabi/#:~:text=ABU%20DHABI%20%E2%80%94%20Kazakhstan%20has,IRENA%29%20Assembly%20on>. (Дата обращения 11.09.25).

6. Суслова О.В., Шульга Р.Н. Техничко-экономические характеристики преобразовательных подстанций для электропередач и вставок постоянного тока // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2017. № 2 (76). с. 125.

ТАСПАЛЫ КОНВЕЙЕРДІҢ АЙНЫМАЛЫ ТОКТЫ ЖИІЛІГІНІҢ РЕТТЕЛЕТІН ЭЛЕКТР ЖЕТЕГІНІҢ АВТОМАТТЫ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНІҢ ПАРАМЕТРЛІК СИНТЕЗІ

«Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті»,
 КеАҚ, Алматы қ., Қазақстан
 e-mail: zh.toygozhinova@aes.kz, d.chnybaeva@aes.kz

The screenshot displays the STRUK SXEMA software interface, which is used for creating and simulating control system block diagrams. The main window shows a complex control system diagram with the following components and connections:

- Reference Input:** A block labeled U_2 provides the reference signal.
- Summing Junctions:** There are two primary summing junctions. The first combines the reference signal with a feedback signal to produce the error signal. The second combines the output of the first summing junction with a feedforward signal.
- Controller:** The error signal is processed by a controller block with the transfer function $\frac{k_p}{T_p \cdot s + 1}$.
- Feedforward Path:** The output of the first summing junction is also fed into a feedforward block with the transfer function $\frac{b_1}{T_e \cdot s + 1}$. This block's output is summed with the controller's output.
- Plant and Feedback:** The combined signal enters a plant block with the transfer function $\frac{k_1}{s}$, producing the output X_1 . This output is fed back through a block with the transfer function $\frac{k_2}{T_{q2} \cdot s + 1}$ to the second summing junction. Additionally, the output X_1 is fed back through a gain block K_d to the first summing junction.
- Internal Signals:** The diagram labels intermediate signals such as X_2 , X_3 , X_4 , X_5 , X_6 , and X_7 at various points in the system.
- Simulation Elements:** The diagram includes step function blocks labeled "Step1" and "Step2", and gain blocks labeled K_1 and K_2 .

The software interface includes a standard menu bar (File, Edit, View, Simulation, Format, Tools, Help) and a toolbar with icons for file operations, simulation control, and diagram editing. The status bar at the bottom indicates the software is "Ready" and shows the zoom level at 119%.

1 суретте конвейердің электр жетегінің әрбір асинхронды қозғалтқышы сызықты құрылымдық сұлбада төмендегі беріліс функциялармен жазылады [1]:

$$W_1(s) = \frac{K_1}{s}, \quad (1)$$

$$W_2(s) = \frac{b}{T_E s + 1}, \quad (2)$$

мұндағы $K_1 = 1/(b \cdot T_m)$, b – асинхронды қозғалтқыштың механикалық сипаттамасының қатаңдығы, T_m – қозғалтқыштың электр механикалық уақыт тұрақтысы, T_E – статор және ротор тізбектерінің электр магниттік уақыт тұрақтысы.

Асинхронды қозғалтқыштың (1) және (2) беріліс функциялары қозғалтқыштың жылдамдығы бойынша қатаң теріс байланыстан тұрады. Конвейердің электр жетегінің қозғалтқыштарын қоректендіру жиілікті түрлендіргішпен жүзеге асырылады, ол құрылымдық сұлбада төмендегі беріліс функциясымен көрсетілген:

$$W_P(s) = \frac{k_P}{T_P s + 1}, \quad (3)$$

мұндағы k_P – жиілік түрлендіргішінің (ЖТ) беріліс коэффициенті, T_P – қозғалтқыштың статор және ротор тізбектерінің электр магниттік уақыт тұрақтысы.

Жиілік түрлендіргішінің кернеуін тұрақтандыру ауытқуды басқару принципі негізінде жүзеге асырылады. Басқару жүйесінің параметрлерін және жиілікті түрлендіргішінің беріліс коэффициентін синтездеу мәселесін шешу үшін, ең алдымен (1), (2) және (3) беріліс функциялары мен басқару жүйесінің элементтері негізінде таспалы конвейердің асинхронды қозғалтқыштарының жылдамдықтары мен моменттерінің өтпелі үрдістерінің математикалық сипаттамасын аламыз. Таспалы конвейер динамикасының математикалық сипаттамасы:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= k_1(x_2 + x_3 - x_6 - m_{c1}), \\ \frac{dx_2}{dt} &= \frac{b}{T_e}x_7 - \frac{b}{T_e}x_1 - \frac{1}{T_e}x_2 \\ \frac{dx_3}{dt} &= \frac{k_2}{T_q}x_5 - \frac{k_2}{T_q}x_1 - \frac{1}{T_q}x_3, \\ \frac{dx_4}{dt} &= \frac{b}{T_e}x_7 - \frac{b}{T_e}x_5 - \frac{1}{T_e}x_4, \\ \frac{dx_5}{dt} &= k_1(x_4 - x_3 + x_6 - m_{c2}), \\ \frac{dx_6}{dt} &= \frac{k_2}{T_q}x_1 - \frac{k_2}{T_q}x_5 - \frac{1}{T_q}x_6, \\ \frac{dx_7}{dt} &= \left(\frac{k_P}{T_P}\right)/(1 - k_y \text{sign}(u - k_u x_7)) \cdot u - \\ &\quad (((k_P k_u)/T_P)/(1 - k_y \text{sign}(u - k_u x_7)) - \frac{1}{T_P})x_7, \end{aligned} \quad (4)$$

мұндағы $x_1 = \omega_1$ – бірінші асинхронды қозғалтқыштың бұрыштық жылдамдығы; $x_2 = M_1$ – бірінші асинхронды қозғалтқыштың электр магниттік моменті; $x_3 = F_1$ – конвейер таспасының (таспаның жұмыс бөлігінің) тартылу күші; $x_4 = M_2$ – екінші асинхронды қозғалтқыштың электр магниттік моменті; $x_5 = \omega_2$ – екінші асинхронды қозғалтқыштың бұрыштық жылдамдығы; $x_6 = F_2$ – конвейер таспасының тартылу күші (таспаның жұмыс істемейтін бөлігі); $x_7 = u_p$ – жиілікті түрлендіргішінің шығысындағы кернеу; k_y – күшейту коэффициенті (жиынтық буын мен көбейткіш буын арасындағы байланыс коэффициенті); k_U – жиілікті түрлендіргішінің кернеуі бойынша кері байланыс коэффициенті.

Асинхронды қозғалтқыштар параметрлерінің берілген сандық мәндерінде және технологиялық байланыстар параметрлерінде k_y , k_U басқару жүйесінің коэффициенттері мен k_p жиілікті түрлендіргіш коэффициенті параметрлік синтезге жатады. Басқару жүйесінің параметрлерін синтездеу алгоритмі:

1. Аналитикалық түрде функция төмендегідей анықталған [2]:
- 2.

$$q(x_i) = V(x) + W, \quad (5)$$

мұндағы $V(x_i)$ – Ляпунов функциясы, $W = \frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x_i} \cdot \frac{dx_i}{dt}$ – Ляпунов функциясының туындысы, $\frac{dx_i}{dt}$ – i реттік тендеудің оң бөлігі (4).

2. (5) функция кездейсоқ сандар датчигінің көмегімен кездейсоқ сандармен берілетін басқару жүйесінің параметрлерін ескере отырып, интерполяция – экстраполяция [3] сандық әдісімен азайтылады.

3. Дифференциалдық тендеулер жүйесі (4) басқару жүйесінің орнықтылығы анықталатын асинхронды қозғалтқыштың бұрыштық жылдамдық сызбасын алу мақсатында Рунге – Кутта әдісімен [4] шешіледі.

MATLAB жүйесінің алгоритмдік тілінде құрастырылған параметрлер синтезінің бағдарламасы [5] 2 суретте көрсетілген.

```
function PROGR
clc
global Kp ; global s2; global Ky;
global s4; global Ku; global s6;
n=7; h=0.01; e=0.001;
for i=1:n a(i)=1; end
g=0; s1=0; s3=0; s5=0; m=100;
for i=1:m
    j=1; while j<1000 s=1;
        while s~=0
            for i=1:n z=a(i);
```

```

v=podpr(a(1),a(2),a(3),a(4),a(5),a(6),a(7));
a(i)=z-h;
w=podpr(a(1),a(2),a(3),a(4),a(5),a(6),a(7));
a(i)=z+h;
u=podpr(a(1),a(2),a(3),a(4),a(5),a(6),a(7));
t=w*(2*z+h)-4*v*z+u*(2*z-h);t=t/(w-2*v+u)/2;
if abs(t-z)<=e s=0;end
a(i)=t; end;
if s==0 break;end
end;
j=j+1;
end;
s1=s1+Kp; s2=sqrt((s1/m)^2);
s3=s3+Ky; s4=sqrt((s3/m)^2);
s5=s5+Ku; s6=sqrt((s5/m)^2); g=g+1;
if g>=m break;end
end
Kp=s2; KY=s4; Ku=s6;
disp(' Результаты счета: ');
disp(' Коэффициент Kp'); disp('Kp='); disp(Kp);
disp(' Коэффициент Ky'); disp('Ky='); disp(Ky);
disp(' Коэффициент Ku'); disp('Ku='); disp(Ku);
x0=[0;0;0;0;0;0;0];
[T, X]=ode45(@systm, [0 2],x0);
plot(T,X(:,1),'k.-')
xlabel('time (c).')
ylabel('Speed (x1).')
grid
function dx=systm(t,x)
dx=zeros(7,1);
b=25; Te=0.05; Tm=0.22; K1=1/(b*Tm);
K2=5; Tq=0.5; Tp=0.001; Mc=50; U=5;
dx(1)=K1*x(2)+K1*x(3)-K1*x(6)-K1*Mc;
dx(2)=(b/Te)*x(7)-(b/Te)*x(1)-(1/Te)*x(2);
dx(3)=(K2/Tq)*x(5)-(K2/Tq)*x(1)-(1/Tq)*x(3);
dx(4)=(b/Te)*x(7)-(b/Te)*x(5)-(1/Te)*x(4);
dx(5)=K1*x(4)-K1*x(3)+K1*x(6)-K1*Mc;
dx(6)=(K2/Tq)*x(1)-(K2/Tq)*x(5)-(1/Tq)*x(6);
dx(7)=(Kp/Tp)/(1-Ky*sign(U-Ku*x(7)))*U-...
(((Ku*Kp)/Tp)/(1-Ky*sign(U-Ku*x(7)))-(1/Tp))*x(7);
end
function q=podpr(x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7)
Kp=rand*50; Ky=rand; Ku=rand^5;
b=25; Te=0.05; Tm=0.22; K1=1/(b*Tm);
K2=5; Tq=0.5; Tp=0.001; U=5;

```

```

q=x1^2+x2^2+x3^2+x4^2+x5^2+x6^2+x7^2+...
2*x1*(K1*x2+K1*x3-K1*x6)+...
2*x2*((b/Te)*x7-(b/Te)*x1-(1/Te)*x2)+...
2*x3*((K2/Tq)*x5-(K2/Tq)*x1-(1/Tq)*x3)+...
2*x4*((b/Te)*x7-(b/Te)*x5-(1/Te)*x4)+...
2*x5*(K1*x4-K1*x3+K1*x6)+...
2*x6*((K2/Tq)*x1-(K2/Tq)*x5-(1/Tq)*x6)+...
2*x7*((Kp/Tr)/(1-Ky*sign(U-Ku*x7))*U-...
(((Ku*Kp)/Tr)/(1-Ky*sign(U-Ku*x7))-(1/Tr))*x7);
end
end

```

2 сурет - Электр жетегін басқару жүйесінің параметрлерін синтездеу бағдарламасы

Есептеу реті:

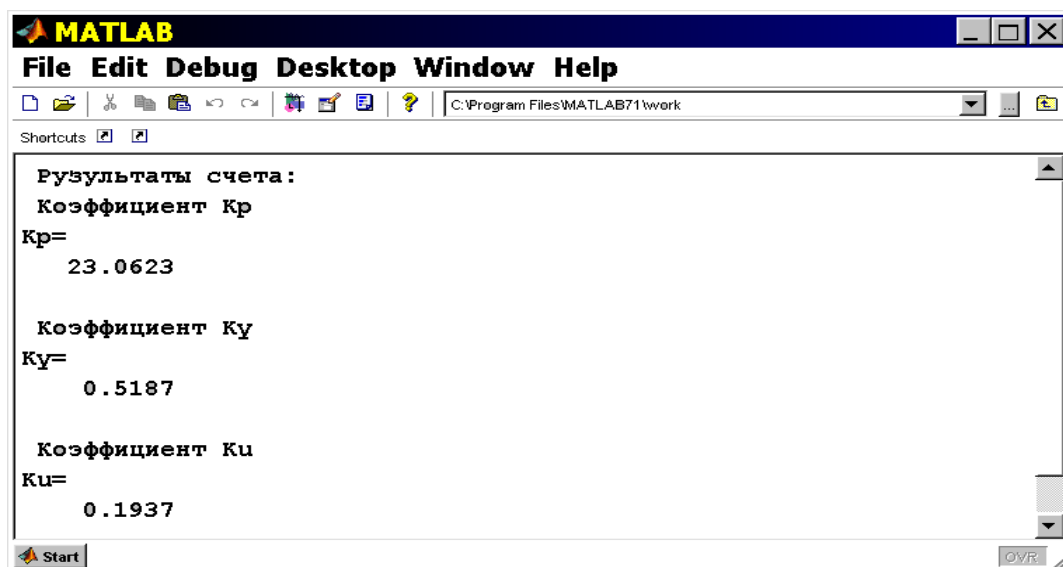
1. Бастапқы деректер енгізіледі: n ; h ; e - айнымалылар саны, көптеген айнымалылар функциясының минимумын іздеудің бастапқы қадамы ($q = \text{rodfpr}(x_1, x_2, \dots, x_7)$), есептеу қателігі.

2. Интерполяция-экстраполяция әдісінен шығуды шартты ауысу операторы `if s = 0 break; end` жүзеге асырады.

3. Бастапқы деректермен дифференциалдық теңдеулердің шешімдері `dx=system(t,x)` функциясымен орындалады.

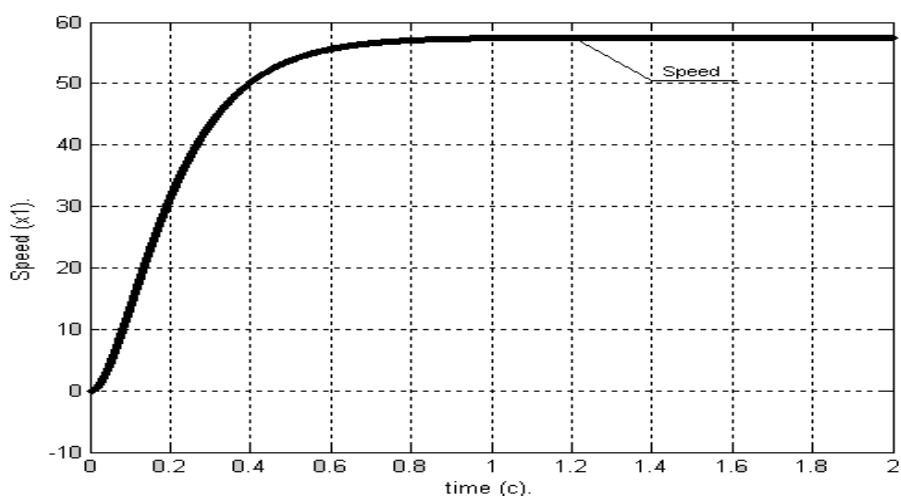
Бағдарламаны есептеу нәтижелерін шығару: қажетті параметрлердің сандық мәндерін және бұрыштық жылдамдықтың өтпелі үрдісінің сызбасы бір уақытта дербес компьютердің (ДК) экранында жүзеге асырылады.

Қозғалтқыштың жылдамдық сызбасының визуалды түріне сәйкес басқару жүйесінің тұрақтылығы және қажетті k_p , k_y және k_u параметрлерді таңдау анықталады. Санау нәтижелері: 3 суретте көрсетілген.



3 сурет – Беріліс коэффициенттерінің есептелген мәндері

Асинхронды қозғалтқыштың бұрыштық жылдамдығының өтпелі үрдісі 4 суретте көрсетілген.



4 сурет - Асинхронды қозғалтқыштың бұрыштық жылдамдығының өтпелі үрдісі

Таспалы конвейердің асинхронды қозғалтқышының бұрыштық жылдамдығының өтпелі үрдіс сызбасының түрі арқылы конвейердің электр жетегінің қозғалысының тұрақтылығы орындалатындығын байқауға болады. Осыған сәйкес 3 суретте көрсетілген басқару жүйесінің алынған параметрлері оңтайлы екендігі байқалады.

Әдебиеттер тізімі

- [1] Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. –М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 304 с.
- [2] Деруссо П., Рой Р., Клоуз Ч. Пространство состояний в теории управления Главная редакция физико – математической литературы изд – ва «Наука», М., 1970, 620 с.
- [3] Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. –М.: Наука, Гл. ред. физ. – мат. лит., 1987. – 240 с.
- [4] Алексеев Е.Р., Чеснокова О.В. А46 MATLAB 7. – М.: НТ Пресс , 2006. -464 с.
- [5] Дьяконов В.П. MATLAB 7 /R2006/R2007 Самоучитель. – М.: ДМКПресс, 2008. -768 с.

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Абылгазин Э.Е.

Алматинский университет энергетики и связи им.Г. Даукеева, г. Алматы,
Казахстан

* e-mail: el.abylgazin@au.es.kz

Введение

Воздушные линии высокого напряжения являются ключевым элементом электросетевого комплекса, обеспечивающим передачу электроэнергии от центров генерации к потребителям. Их роль в современной энергетике трудно переоценить: именно благодаря ВЛ ВН обеспечивается межсистемный обмен мощностью, интеграция крупных электростанций и надежность энергоснабжения в масштабах страны. Однако растущий спрос на электроэнергию, увеличение доли возобновляемых источников и появление новых промышленных кластеров приводят к перегрузке существующей инфраструктуры.

Строительство новых линий сопряжено с колоссальными затратами, сложностями согласования земельных вопросов и необходимостью длительного проектирования. По этой причине повышение пропускной способности существующих линий становится одним из приоритетных направлений развития отрасли. Современные технические и организационные решения позволяют значительно увеличить мощность передачи при минимальных капитальных вложениях и без необходимости создания дополнительных коридоров для ВЛ.

Цель данной статьи заключается в рассмотрении основных факторов, ограничивающих пропускную способность ВЛ ВН, и анализе современных методов её повышения. В работе также уделено внимание перспективным направлениям исследований, связанным с внедрением новых материалов и цифровых технологий, способных вывести электросетевую отрасль на качественно новый уровень.

1. Конструкция проводов и параметры воздушных линий

Конструкция проводов является одной из ключевых характеристик, определяющих эффективность работы воздушных линий высокого напряжения. Провод состоит из токопроводящей части, сердечника (несущей основы) и защитных покрытий. Наиболее распространёнными в мировой практике являются сталеалюминиевые провода (АС), в которых стальной сердечник обеспечивает механическую прочность, а алюминиевая обмотка — высокую электропроводность. Такое сочетание позволяет одновременно выдерживать механические нагрузки (ветровые, гололёдные, температурные) и обеспечивать передачу больших токов [4].

Параметры воздушной линии напрямую зависят от свойств провода. Ключевыми характеристиками являются: электрическое сопротивление, определяющее потери на нагрев; максимально допустимая температура нагрева, ограничивающая токовую нагрузку; допустимое провисание, влияющее на габариты линии; механическая прочность и масса на единицу длины, определяющие нагрузку на опоры и пролёты.

Современные требования к проводам ВЛ ВН включают не только высокую электропроводность, но и устойчивость к коррозии, длительный срок службы и стабильность параметров в условиях экстремального климата. В зависимости от условий эксплуатации применяются различные конструкции: с алюминием повышенной прочности, с композитным сердечником, с покрытием для защиты от коррозии.

Особое значение имеет выбор диаметра и сечения провода. Увеличение сечения снижает электрическое сопротивление и потери мощности, однако повышает массу и нагрузку на опоры. Поэтому задача проектировщиков заключается в нахождении оптимального баланса между электрическими и механическими характеристиками. Важно также учитывать явление коронного разряда, возникающего при высоких напряжениях. Для его снижения применяются провода большего диаметра или расщеплённые провода, состоящие из нескольких параллельных жил.

Расщепленные провода широко применяются на линиях напряжением 220 кВ и выше. Такая конструкция уменьшает плотность электрического поля, снижает потери на корону и уровень радиопомех, а также улучшает распределение тока по поверхности проводника. В результате увеличивается эффективная пропускная способность линии и улучшается качество электроэнергии [4].

Таким образом, конструкция провода и его параметры напрямую определяют возможности ВЛ по передаче мощности. Использование современных проводов с улучшенными характеристиками становится основой для повышения пропускной способности линий без масштабной реконструкции инфраструктуры.

2. Ограничивающие факторы и новые типы проводов

Пропускная способность воздушной линии напрямую связана с её тепловыми и электрическими характеристиками. При прохождении электрического тока проводник нагревается, и если его температура превышает допустимое значение, происходит чрезмерное провисание. Это приводит к нарушению безопасных габаритов относительно земли и зданий, увеличению риска коротких замыканий при сильном ветре или гололёде. Нагрев проводов также способствует ускоренному старению материалов и снижению их механической прочности. Вдобавок высокие температуры увеличивают потери энергии и повышают вероятность возникновения коронных разрядов, сопровождающихся потерями мощности и шумовым воздействием [1].

Долгое время основным материалом для ВЛ оставались сталеалюминиевые провода. Их преимущества заключались в относительной дешевизне и прочности, однако возможности таких проводов ограничены. Решением стали высокотемпературные низкопровисающие провода (HTLS). Они способны работать при значительно более высоких температурах — до 200–250 °С, в то время как традиционные провода допускают лишь около 80–90 °С. Это позволяет увеличить допустимый ток в линии в полтора–два раза [3].

Особенность HTLS-проводов заключается в применении современных материалов: композитных сердечников, алюминиевых сплавов с высокой термостойкостью, а также гибридных конструкций. Благодаря этому они обладают меньшим коэффициентом теплового удлинения, что предотвращает сильное провисание. Практика показала, что модернизация существующих ВЛ путём замены проводов на HTLS может повысить их пропускную способность на десятки процентов без необходимости реконструкции опор. Это особенно важно в условиях плотной застройки или в местах, где создание новых трасс линий невозможно [5]. На рисунке 1 приведена зависимость провисания различных проводов от температуры.

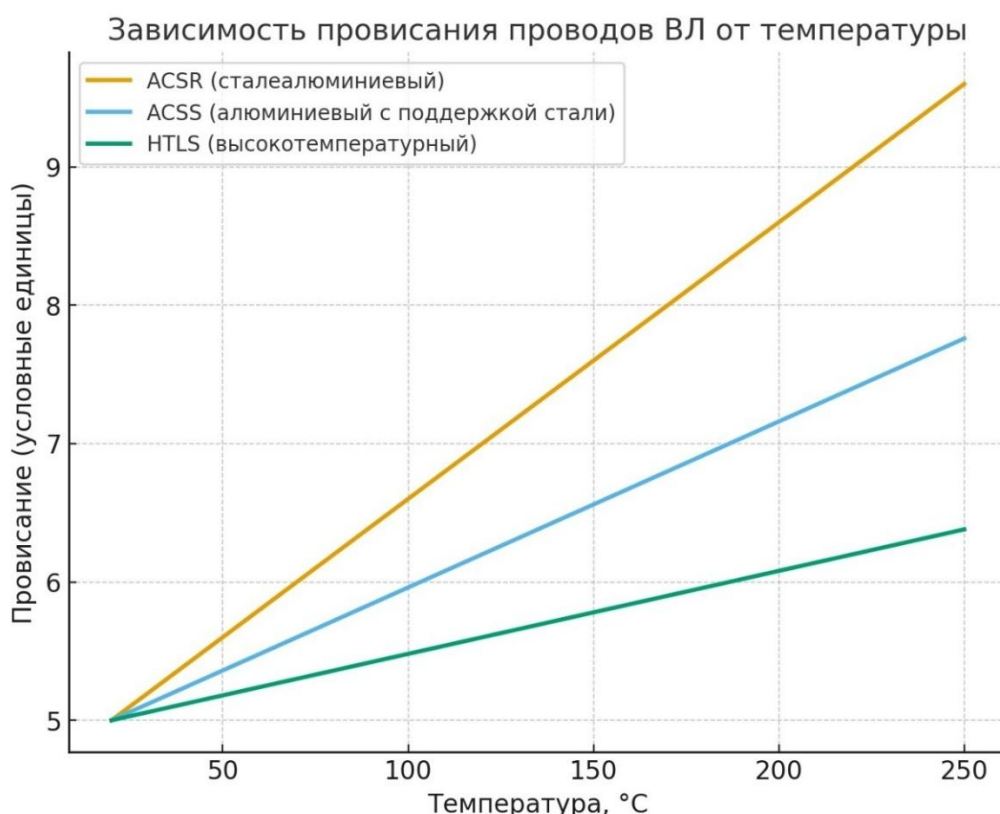


Рис. 1 – Зависимость провисания проводов ВЛ от температуры

Таким образом, переход к новым типам проводов можно рассматривать как одно из наиболее эффективных решений, позволяющих обеспечить рост мощности передачи при минимальных вложениях и без масштабных строительных проектов.

3. Динамическое управление и интеллектуальные системы

Традиционные методы эксплуатации ВЛ предполагают использование фиксированных расчётных значений допустимой нагрузки. Эти значения выбираются исходя из климатических условий региона и создают значительный запас надёжности. Однако реальные условия эксплуатации постоянно меняются: скорость ветра, температура воздуха, солнечная радиация и влажность оказывают прямое влияние на степень нагрева проводов. В результате фактический потенциал линии используется лишь частично, а её реальная пропускная способность оказывается выше проектной.

Для устранения этого несоответствия всё чаще внедряются системы динамического управления пропускной способностью (Dynamic Line Rating, DLR). Они предполагают оснащение линии датчиками, которые в реальном времени измеряют температуру проводов, угол их провисания, вибрации и другие параметры. На основе этих данных специализированные программные комплексы рассчитывают максимально допустимую токовую нагрузку в текущих условиях.

Применение DLR позволяет значительно увеличить эффективность использования сети. По оценкам, прирост пропускной способности составляет 15–30 % в зависимости от погодных условий. Особенно ощутим этот эффект в регионах с сильными ветрами или низкими температурами воздуха, где естественное охлаждение проводов позволяет передавать большие токи без риска перегрева [2].

Следующим этапом развития является интеграция DLR в концепцию «умных сетей». Интеллектуальные системы управления не только анализируют данные о текущем состоянии линий, но и прогнозируют режимы работы на основе метеорологических прогнозов и статистики нагрузок. Дополнительно внедряется концепция цифрового двойника ВЛ, позволяющая моделировать различные сценарии эксплуатации и заранее выявлять риски перегрузок или повреждений.

Таким образом, внедрение динамических и интеллектуальных систем является одним из наиболее перспективных направлений, позволяющих повысить надёжность и пропускную способность без физической модернизации проводов и опор.

4. Компенсирующие устройства и цифровизация процессов

Не менее важным направлением повышения эффективности ВЛ является управление потоками мощности и реактивной составляющей тока. Значительная часть потерь в сети связана именно с реактивной мощностью, которая не приносит полезной работы, но нагружает оборудование. Для борьбы с этим применяются компенсирующие устройства: статические вар-компенсаторы (SVC), синхронные компенсаторы и особенно установки FACTS (Flexible AC Transmission Systems).

Устройства FACTS обеспечивают гибкое управление режимами работы сети. Они позволяют регулировать поток активной и реактивной мощности, поддерживать напряжение на стабильном уровне и предотвращать перегрузки отдельных участков. В условиях, когда несколько линий соединяют разные районы энергосистемы, FACTS дают возможность перераспределять нагрузку так, чтобы максимально задействовать доступные ресурсы. В результате удаётся повысить пропускную способность без необходимости строительства новых линий или замены проводов [1].

Цифровизация процессов эксплуатации играет не менее важную роль. Современные системы мониторинга собирают данные не только о параметрах линии, но и о состоянии опор, изоляторов и соединительных узлов. Применение технологий Интернета вещей (IoT) позволяет устанавливать датчики на ключевых элементах ВЛ, что обеспечивает полный контроль за её состоянием. Информация передаётся в диспетчерские центры и используется для анализа, прогнозирования отказов и планирования ремонтных работ.

Таким образом, компенсирующие устройства и цифровые технологии выступают мощным инструментом повышения эффективности ВЛ. Их применение обеспечивает не только рост пропускной способности, но и улучшение надёжности, снижение эксплуатационных затрат и повышение прозрачности работы энергосистемы.

5. Перспективы применения новых материалов и экологические аспекты

Развитие энергетики невозможно без внедрения инновационных материалов. Сегодня активно разрабатываются композитные материалы для проводов, арматуры и опорных конструкций. Они обладают меньшей массой, высокой прочностью и стойкостью к коррозии, что позволяет снизить эксплуатационные расходы и увеличить долговечность линий.

Особое внимание уделяется разработке проводов с улучшенной теплопроводностью и стойкостью к экстремальным климатическим условиям. Применение нанотехнологий открывает перспективы создания новых проводников, способных работать при сверхвысоких температурах без потери механических свойств [3].

Экологическая составляющая также становится всё более значимой. Повышение пропускной способности линии может привести к усилению коронных разрядов и росту шумового воздействия. Для минимизации этих эффектов используются специальные конструкции проводов с гладкой поверхностью, новые типы гирлянд изоляторов и оптимизированные конфигурации опор.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на развитие систем искусственного интеллекта для прогнозирования нагрузок и управления потоками мощности. Интеграция возобновляемых источников потребует создания более гибкой и адаптивной сетевой инфраструктуры. Перспективным

направлением станет разработка цифровых двойников не только отдельных ВЛ, но и всей энергосистемы, что позволит проводить глубокий анализ сценариев эксплуатации. Кроме того, важнейшей задачей остаётся создание новых проводниковых материалов с повышенной теплопроводностью и устойчивостью к климатическим воздействиям. Эти исследования станут основой для формирования энергетической системы будущего.

Список литературы

1. Кудрявцев, В.Н. Электрические сети и системы: учебник / В.Н. Кудрявцев. – Москва: Энергоатомиздат, 2019. – 368 с.
2. Ломадзе, В.А. Динамический рейтинг линий электропередачи напряжением 110 кВ / В. А. Ломадзе // Foundations and Trends in Research. – 2023. – № 2.
3. Мельников, С.А. Мониторинг линий электропередачи в задачах управления пропускной способностью в режиме реального времени / С. А. Мельников [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2018.
4. Неизолированные провода воздушных линий электропередачи: проблема выбора (аналитический обзор) // RusCable.Ru: [сайт]. – 2015. – URL:https://www.ruscable.ru/article/neizolirovanye_provoda_lep_problema_vybora/
5. HTLS-проводники // VERI Cable: [сайт]. – URL:<https://vericable.com/ru/cable-products/htls-conductors/>.

УДК 621.316.72

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ И КОНФИГУРАЦИИ SVC В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА РОЯ ЧАСТИЦ

Абылкаиров Т.М. *, Орлеанский С.А., Бектимиров А.Т.

Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы,
Казахстан

* e-mail: t.abylkairov@aes.kz, s.orleanskiy@aes.kz, a.bektimirov@aes.kz

1 Постановка задачи и алгоритм роя частиц для оптимизации размещения и конфигурации SVC в распределительных сетях.

В распределительных сетях рост нагрузок приводит к просадкам напряжения в узлах, увеличению потерь активной мощности и токовых загрузок линий и силовых трансформаторов. Также высокая доля распределённой генерации (далее – ВИЭ) в сети приводит к повышенным уровням напряжения и локальным перегрузкам элементов сети.

Традиционные решения на базе конденсаторных батарей и стандартных устройств компенсации реактивной мощности обеспечивают лишь локальную

компенсацию. Они не дают требуемой управляемости профиля напряжения вдоль фидеров. Эффект особенно проявляется при суточно-сезонной изменчивости режимов. Ситуация усугубляется при подключении новых потребителей и росте доли ВИЭ. В этих условиях возрастает потребность в координированном применении устройств FACTS, в частности SVC [1].

Постановка задачи носит многокритериальный характер. Целями задачи являются: снизить активные потери, удерживать узловые напряжения в допустимых пределах для репрезентативных режимов и сократить объем подводимой SVC реактивной мощности до минимально оптимального значения. Все решения должны соответствовать эксплуатационным ограничениям. Учитываются допустимые уровни напряжения на шинах, токовые и термические пределы линий и силовых трансформаторов, а также паспортные диапазоны и динамика регулирования устройств. Такая постановка соответствует практике планирования распределительных сетей и задаёт основу для последующего выбора технически и экономически обоснованных конфигураций [2].

Предлагаемая постановка задачи представляет собой смешанную оптимизацию для распределительных сетей, где дискретно определяется набор шин установки SVC, а непрерывно — уставки их реактивной мощности. Расчёт выполняется совместно с потокораспределением переменного тока в установившихся режимах. В силу комбинаторной трудоёмкости и нелинейности такая задача плохо масштабируется градиентными и иными детерминированными методами и склонна к попаданию в локальные минимумы, что обосновывает применение метаэвристического подхода.

В качестве оптимизационного алгоритма используется модифицированный алгоритм роя частиц (PSO): каждая частица кодирует конфигурацию «шина установки — уставка реактивной мощности (Q)». На каждой итерации выполняется расчёт установившегося режима методом Ньютона–Рафсона с проверкой допустимости по узловым напряжениям, токовым и термическим нагрузкам линий и силовых трансформаторов, а также по паспортным диапазонам и скоростям регулирования SVC. По мере поиска формируется архив Парето-недоминируемых решений. Реализация на Python с использованием `pandapower` обеспечивает воспроизводимость расчётов, удобную интеграцию для цифрового планирования и быстрое время вычислений.

Практическая значимость подхода состоит в том, что он даёт инженерно пригодные конфигурации размещения и уставок SVC, которые поддерживают профиль напряжения по длине фидеров при различных сценариях нагрузки и выработки ВИЭ, снижают активные потери и разгружают трансформаторы и линии по току. Это повышает пропускную способность существующей инфраструктуры, улучшает готовность сети к подключению новых потребителей

и позволяет откладывать капиталоемкие мероприятия по усилению сети за счёт целенаправленной локальной компенсации реактивной мощности. Представление результатов в виде Парето-фронта делает компромиссы прозрачными и позволяет оператору выбрать конфигурацию в соответствии с приоритетами — от акцента на соблюдении показателей качества напряжения до ориентации на минимизацию совокупных затрат.

Таким образом, сформулированная задача и предложенный метод обеспечивают согласованное решение трёх ключевых требований — технической реализуемости при строгих эксплуатационных ограничениях, достижения целевых показателей параметров сети и экономической рациональности — и предоставляют оператору сети прозрачный Парето-набор альтернатив для обоснованного выбора в рамках цифрового планирования и инвестиционного анализа.

2 Поиск оптимума размещения и конфигурации SVC и его результаты

В рамках настоящего исследования расчёт установившегося режима энергосистемы выполнялся с использованием программного обеспечения PowerFactory DigSILENT, реализующего метод Ньютона–Рафсона.

Расчёты выполнены на основе тестовой схемы энергосистемы IEEE-33, предложенной Институтом инженеров электротехники и электроники (IEEE) из-за выраженных просадок напряжения, существенных активных потерь, и компактности модели [3]. Она содержит 33 узла нагрузки номинальным напряжением 12,66 кВ, 32 линии электропередачи, источником питания является система присоединённая к шине 1. Суммарная нагрузка составляет 3,715 МВт и 2,30 Мвар, максимальное отклонение напряжения на шине 18 составляет 8,6%, среднее отклонение от номинального значения – 5,15%. Потери активной мощности составляют 202,7 кВт или 5,5% [4].

На рисунке 1 представлен расчет установившегося режима исходной схемы.

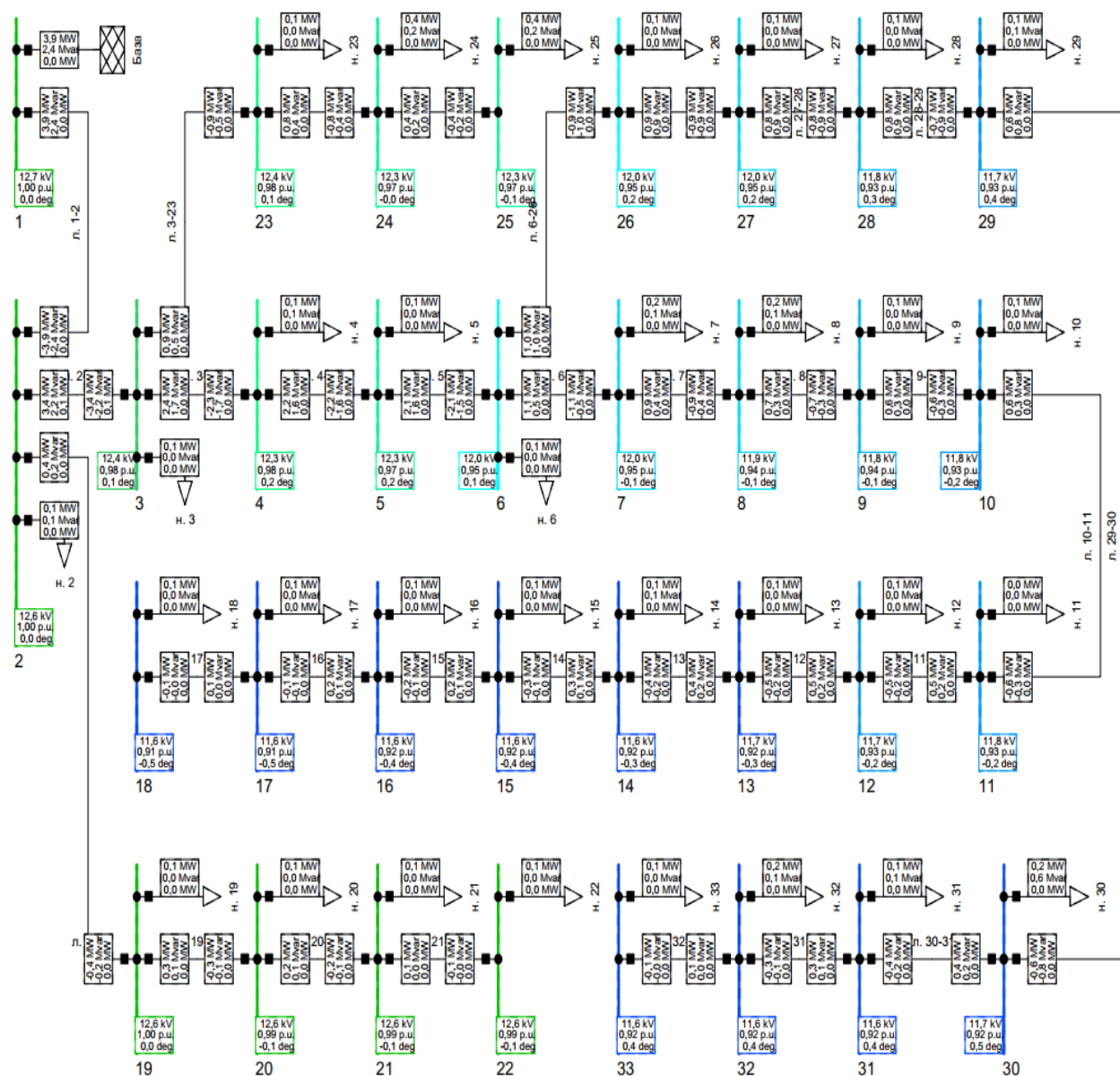


Рис. 1. - Расчет установившегося режима исходной схемы

В результате работы алгоритма, был выполнен расчет 10 000 режимов и процесс оптимизации был завершен в течение 5 минут. На рисунке 2 представлены результаты многокритериальной оптимизации энергосистемы IEEE-33, выполненной с использованием алгоритма PSO. Серые точки отражают допустимые решения с потерями активной мощности менее 1 кВт, общее количество которых составляет 6000. Красные точки соответствуют Парето-оптимальным решениям, число которых достигло 100. Синяя точка обозначает решение с минимальными потерями активной мощности из числа Парето-оптимальных решений.

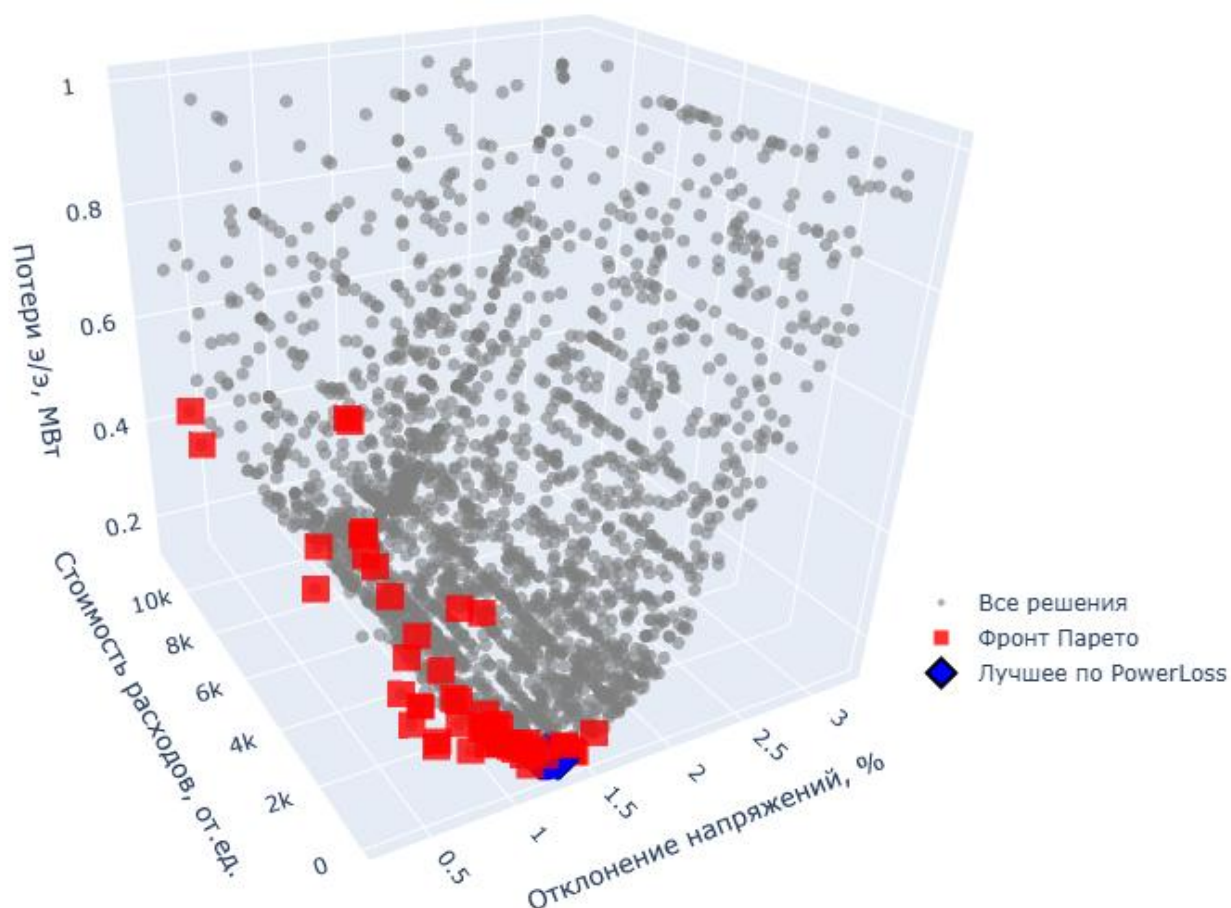


Рис. 2. - Результаты многокритериальной оптимизации методом PSO

В качестве основного решения выбирается точка с минимальными потерями активной мощности, параметры которой приведены в таблице 1. В таблице также представлены итоговые значения целевых функций до и после применения оптимизационного алгоритма, что позволяет наглядно оценить эффективность оптимизации для выбранного Парето-оптимального решения.

Таблица 1 – Оптимизация многокритериальной задачи с помощью фронта Парето методом PSO

Вид оптимизации	Значение решений задачи	
Оптимальный узел для установки SVC	10	30
Оптимальная мощность SVC, кВАр	500	1200
ΔU , о.е., без оптимизации	0,948	
ΔU , о.е., с учетом оптимизации	0,965	
ΔP , кВт, без оптимизации	202 (5,2%)	
ΔP , кВт, с учетом оптимизации	136 (3,5%)	

Проверка решения выявила: нормализацию напряжения по среднему напряжению с 0,95 до 0,97 о.е., уменьшение потерь активной мощности с 202 (5,2%) до 136 кВт (3,5%).

Результаты расчёта установившегося режима после установки SVC и график изменения профиля напряжения в узлах представлены на *рисунках 3 и 4 соответственно*.

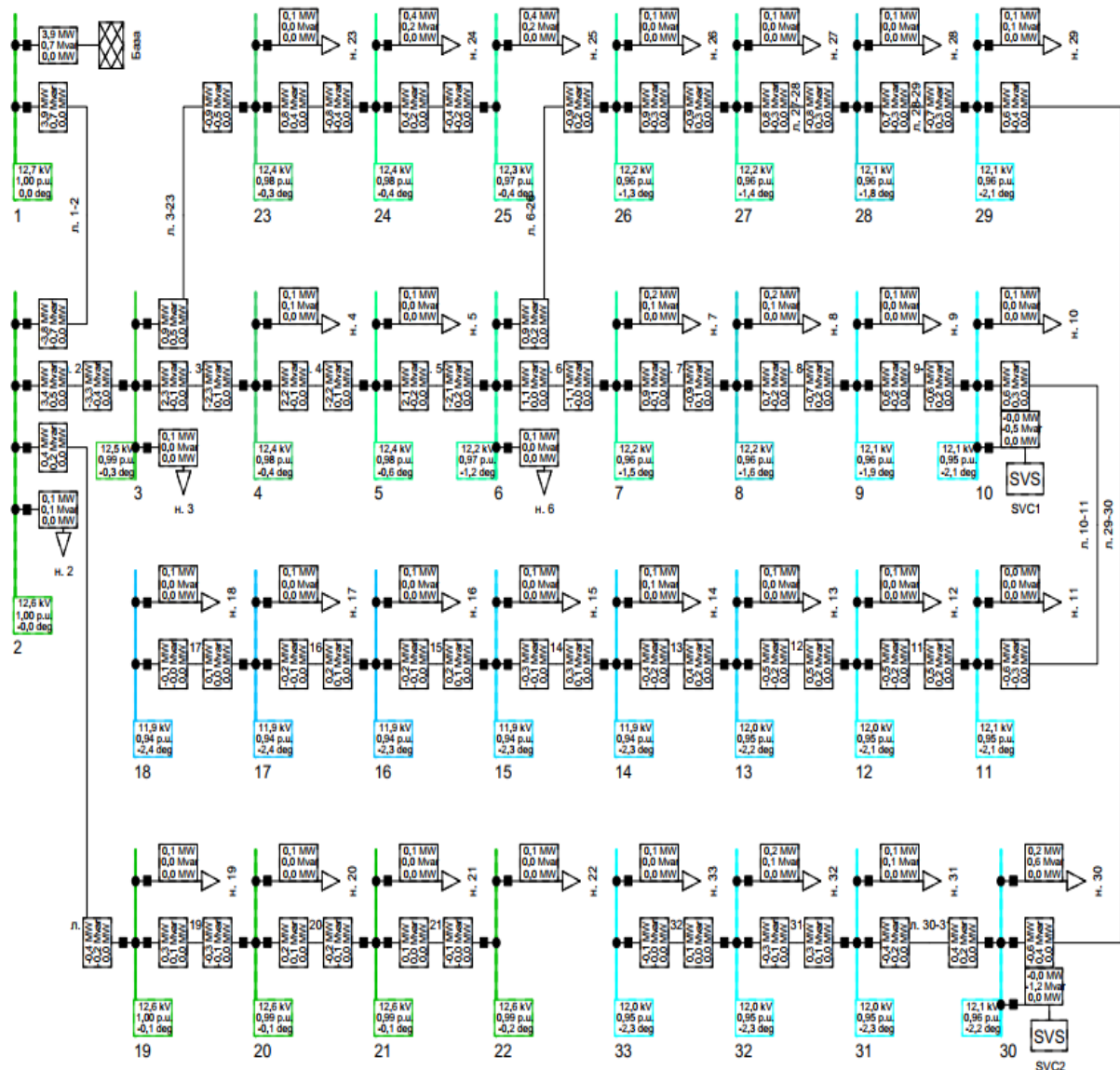


Рис. 3. – Результаты расчёта установившегося режима после установки 2 SVC

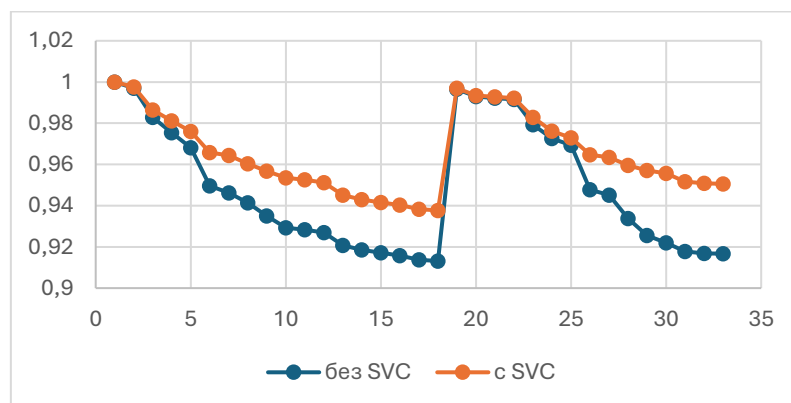


Рис. 4. – График изменения профиля напряжения в узлах

Результаты, полученные в средах pandapower и PowerFactory, подтверждают достоверность и точность выбранного оптимального решения, полученного методом PSO. Эти данные свидетельствуют о соответствии решения заданным критериям и подтверждают эффективность проведённой многокритериальной оптимизации.

3 Заключение

В рамках данного исследования предложен простой практический подход к многокритериальному выбору мест установки и мощностей SVC в распределительных сетях на примере тестовой схемы IEEE-33. Предварительный анализ установившегося режима тестовой схемы, выполненный методом Ньютона–Рафсона в PowerFactory DigSILENT, выявил выраженные просадки напряжения и повышенные потери, что обосновало постановку задачи компенсации реактивной мощности устройствами SVC. Одновременно учитывались три цели: снизить потери активной мощности, уменьшить отклонения напряжения и сократить эксплуатационные затраты. Все решения проверялись на соблюдение ограничений по напряжению, пределам SVC и допустимым перетокам по линиям.

Адаптированный алгоритм роя частиц, реализованный на Python с построением Парето-фронта, обработал 10 000 режимов менее чем за 10 минут, из которых 6000 удовлетворили ограничениям, а 100 решений оказались Парето-эффективными. При выборе по доминирующему критерию минимизации потерь определены оптимальные узлы установки — 10 и 30 — с мощностями устройств SVC 0,5 и 1,2 Мвар соответственно. Полученная конфигурация обеспечила улучшение всех целевых показателей: снижение относительных потерь на 1,7% и уменьшение суммарного отклонения напряжений на 0,2%.

Полученные результаты демонстрируют, что предложенный подход пригоден как инструмент поддержки принятия решений в рамках цифрового планирования режимов: он воспроизводим, вычислительно экономичен и масштабируется на иные топологии без модификации принципов оптимизации. Методика естественно расширяется на многопериодные постановки с учётом неопределённостей нагрузки и генерации ВИЭ. Также возможно производить сравнительные исследования альтернативных средств FACTS (например, STATCOM), что формирует практическую траекторию дальнейшего внедрения в инженерную практику.

Список использованной литературы

1. Chethan, M., Kuppan, R. A review of FACTS device implementation in power systems using optimization techniques. J. Eng. Appl. Sci. 71, 18 (2024),doi: 10.1186/s44147-023-00312-7
2. Применение алгоритма роя частиц для многокритериальной оптимизации размещения устройств FACTS/ Т.М.Абылкаиров, С.А.Орлеанский,

К.К.Тохтибакиев, А.Т.Бектимиров // Вестник Алматинского университета и связи.–2025. –№69. –С.6-21. doi: 10.51775/2790-0886_2025_69_2_6

3. S. H. Dolatabadi, M. Ghorbanian, P. Siano and N. D. Hatziargyriou, "An Enhanced IEEE 33 Bus Benchmark Test System for Distribution System Studies," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 36, no. 3, pp. 2565-2572, May 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3038030.

4. The IEEE Tested Systems. Available at:<http://labs.ece.uw.edu/pstca>.

УДК 621.31

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЗАПАСОВ УСТОЙЧИВОСТИ

Айсаев Е.С.^{1*}, Тергемес К.Т.¹, Шерьязов С.К.², Диярова Л.Д.³

¹НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», Алматы, Казахстан

²Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Российская Федерация

³НАО «Каспийский Университет технологий и инжиниринга» им. Ш. Есенова («Yessenov University»), Актау, Казахстан

*e-mail: e.aisayev@gmail.com

Аннотация. В современных условиях развития электроэнергетики проблема обеспечения динамической устойчивости энергосистем приобретает особую актуальность. Традиционные методы противоаварийной автоматики, основанные на фиксированных пороговых значениях параметров, оказываются недостаточно эффективными при значительном снижении инерционности системы вследствие интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и вывода синхронных генераторов из эксплуатации. В исследовании рассмотрена необходимость перехода от статических алгоритмов управления к адаптивным методам, использующим данные мониторинга в реальном времени.

Основой предлагаемого подхода является система мониторинга запаса устойчивости (СМЗУ), которая обеспечивает вычисление критических углов напряжения между узлами энергосистемы на основе данных WAMS и SCADA. Это позволяет динамически корректировать параметры противоаварийных воздействий, учитывая текущее состояние энергосистемы и её инерционность.

Практическая значимость работы подтверждается на примере моделирования переходных процессов в Мангистауской энергосистеме Казахстана. Результаты показывают, что при снижении момента инерции система теряет синхронизм, однако применение адаптивного алгоритма с дозированным

отключением нагрузки (например, 300 МВт) позволяет восстановить устойчивость и предотвратить асинхронный режим. При этом меньшие объемы отключений оказываются недостаточными, что подчеркивает важность точной настройки управляющих воздействий.

Предложенный метод снижает вероятность чрезмерного отключения нагрузки и обеспечивает более высокую надежность и экономичность энергосистемы. Несмотря на наличие рисков, связанных с отказами телеметрических систем, выбором объема отключения или реверсированием потоков мощности, адаптивное управление формирует современную основу для предотвращения каскадных аварий и повышения устойчивости энергосистем с высокой долей ВИЭ.

Ключевые слова: статическая устойчивость, динамическая устойчивость, система мониторинга запасов устойчивости, противоаварийная автоматика, инерционная постоянная.

1. Введение

Проблема обеспечения устойчивости параллельной работы электроэнергетических систем является одной из ключевых задач, актуальной с момента создания первых энергосистем мирового масштаба. Нарушение устойчивости параллельной работы приводит к потере синхронизма генераторов в различных частях энергосистемы, что вызывает переход генераторов в асинхронный режим с различными угловыми скоростями роторов. Асинхронный режим определен как наиболее критический, поскольку сопровождается значительными колебаниями напряжения в узловых точках сети [1], что, в конечном итоге, может привести к отключению вспомогательных агрегатов тепловых и атомных электростанций [2].

Для обеспечения устойчивости энергосистем разработаны принципы противоаварийной автоматики, направленные на предотвращение нарушения устойчивости путем реализации управляющих воздействий. К таким воздействиям относятся отключение потребителей в дефицитных и генераторов в избыточных зонах энергосистемы, автоматическая загрузка генераторов, форсирование возбуждения, и управление устройствами компенсации реактивной мощности [3]. В качестве сигналов для запуска управляющих воздействий обычно используются фиксированные события, такие как отключение линии, а также параметры перетоков мощности по межсистемным связям и напряжения в узлах. При этом пороговые значения параметров, при достижении которых активируются управляющие воздействия, обычно рассчитываются инженерами заранее и исходят из условия обеспечения устойчивости в исходных и послеаварийных режимах при наиболее неблагоприятных сочетаниях режимно-балансовых факторов.

Однако в условиях высокой интеграции безынерционных возобновляемых источников энергии (далее – ВИЭ) и вывода из эксплуатации тепловых электростанций с синхронными генераторами проблема динамической

устойчивости приобретает особое значение [4, 5]. При условии, что ВИЭ обеспечивают достаточную компенсацию реактивной мощности, поддержание напряжения и имеют резерв активной мощности в системах накопления, задача статической устойчивости может быть эффективно решена. Тем не менее, если ранее, при высокой инерционности энергосистемы, обеспечение статической устойчивости гарантировало и динамическую, то уменьшение момента инерции ставит под сомнение выполнение этого условия. Согласно уравнению движения ротора, ускорение изменения угла ротора под действием возмущений обратно пропорционально значению момента инерции. Следовательно, уменьшение момента инерции увеличивает вероятность достижения ротором критического угла и потери синхронизма генератора или группы генераторов.

С быстрым развитием систем связи и цифровых технологий, наблюдаемость сети значительно повышается благодаря таким системам, как Supervisory Control and Data Acquisition (далее – SCADA) и Wide Area Monitoring System (далее – WAMS). С развитием этих технологий становится возможным внедрение систем, осуществляющих централизованный анализ данных о параметрах электрического режима и их последующую обработку. Одной из таких технологий является система мониторинга запасов устойчивости (далее – СМЗУ).

СМЗУ — это программно-аппаратный комплекс, который в режиме реального времени выполняет расчеты установившегося режима и устойчивости на основе телеметрических данных. Работы [6, 7, 8, 9] подробно описывают основополагающие понятия и принцип работы СМЗУ. На основе результатов расчетов СМЗУ становится возможным применение адаптивных параметров реагирования противоаварийной автоматики для предотвращения динамической устойчивости путем реализации управляющих воздействий. В рамках данной работы предлагается продолжить исследование динамической устойчивости Мангистауской энергосистемы Казахстана [4, 5] путем представления описания нового принципа адаптивной противоаварийной автоматики, ранее не реализованного в энергосистеме Казахстана. Принцип основан на результатах расчетов системы контроля запаса устойчивости и параметрах угла напряжения, полученных с помощью WAMS. В главе 2 описывается принцип работы и организационная структура системы мониторинга запасов устойчивости, конечным результатом которой является значение критического угла между углами напряжения между концами межсистемных линий электропередачи. В главе 3 излагается методика проведения расчетов переходных процессов, в которой описывается исходный и послеаварийный режим, последовательность снижения инерционности для достижения сценария нарушения динамической устойчивости, поясняется реализация управляющих воздействий противоаварийной автоматики и непосредственно команды моделирования в программном обеспечении Power World Simulator 23. В главе 4 описываются результаты расчётов переходных процессов для различных сценариев и объясняются с точки зрения угловых характеристик передачи.

Основные положения данной статьи можно резюмировать следующим образом:

1) Решение новых проблем, связанных с динамической устойчивостью, возникающих в связи с широким распространением неинерционных возобновляемых источников энергии.

2) Предложение новых принципов адаптивного аварийного управления, основанных на WAMS и модуле расчета устойчивости в реальном времени, – переход от традиционных фиксированных пороговых значений параметров запуска к динамически корректируемым настройкам.

3) Подтверждение эффективности адаптивного аварийного управления для поддержания переходной устойчивости по результатам моделирования.

4) Снижение вероятности избыточного отключения нагрузки, вызванного фиксированными пороговыми значениями электрических параметров, рассчитанных заранее.

2. Методология

2.1. Исследуемый установившийся режим

Для проведения анализа в данной работе используется расчетная модель Мангистауской энергосистемы, разработанная в [4]. В данном случае исходный режим для анализа выглядит следующим образом (Рисунок 5):

- 1) Генерация – 775 МВт;
- 2) Потребление – 950 МВт;
- 3) Переток мощности по межсистемным линиям между МАЭК ТЭС 220 кВ и ПС Бейнеу 220 кВ – 183 МВт в сторону МАЭК ТЭС;
- 4) Угол напряжения между МАЭК ТЭС 220 кВ и ПС Бейнеу 220 кВ (далее δ) – 17,157 градуса.

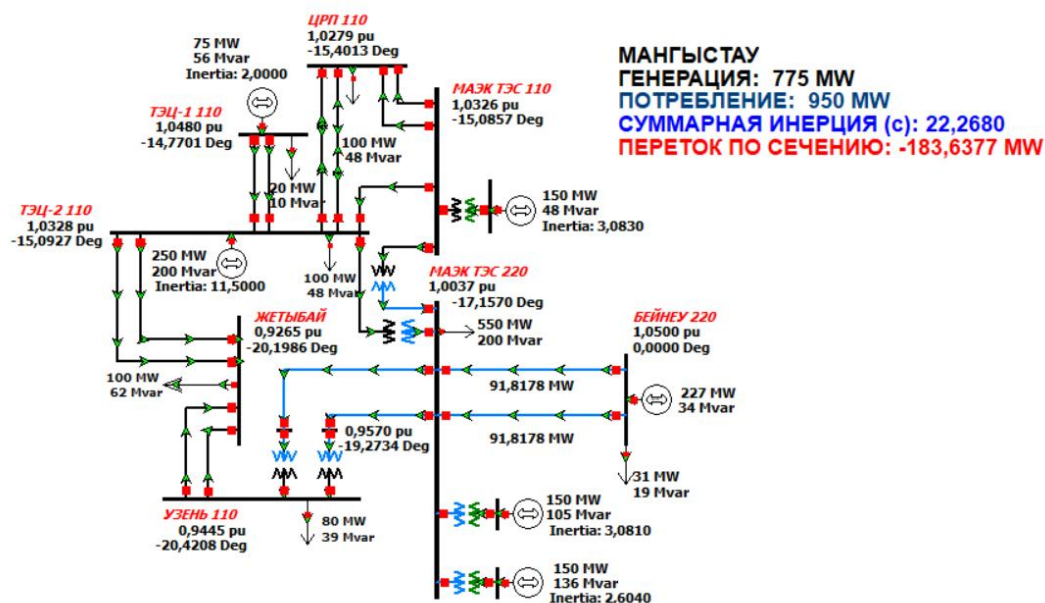


Рисунок 5 – Исходный режим Мангистауской энергосистемы

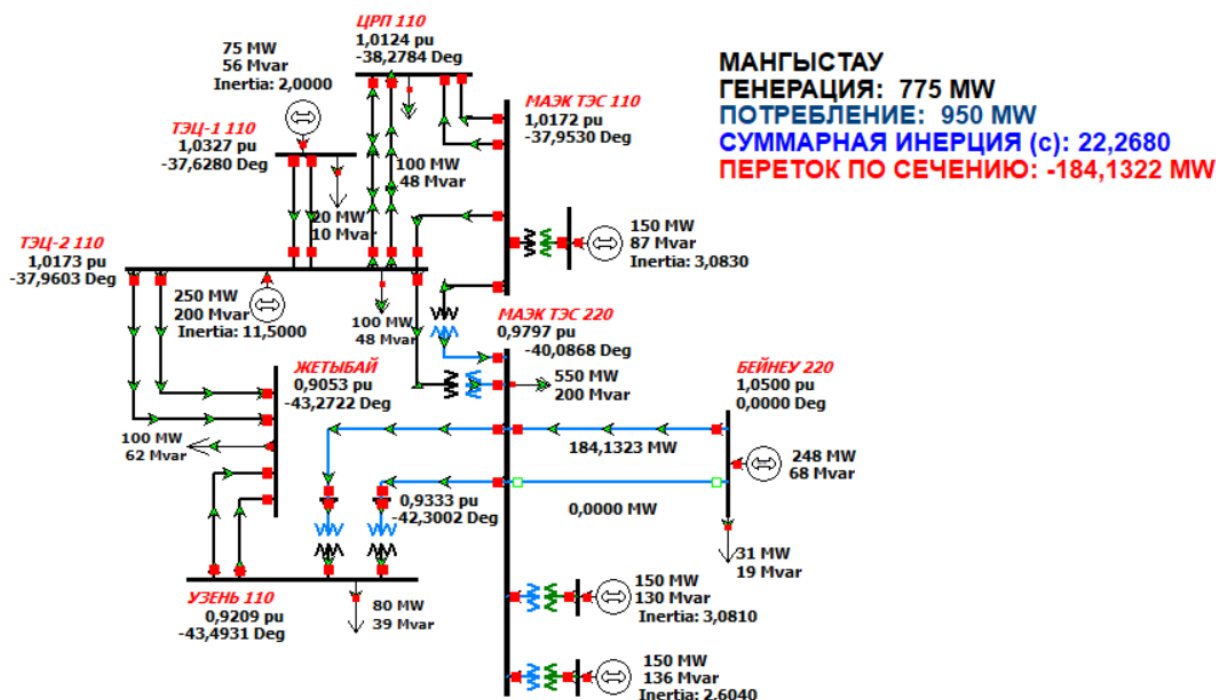


Рисунок 6 – Послеаварийный режим после отключения одной из межсистемных линий 220 кВ

Послеаварийным режимом работы данной схемы является аварийное отключение одной из межсистемных линий 220 кВ. После отключения цепь ослабевает, и вся мощность, протекавшая по отключенной линии, перебрасывается на параллельную неповрежденную линию. Решение режима по Ньютону-Рафсону в послеаварийном режиме имеет сходимость, поэтому можно считать, что установившаяся устойчивость сохраняется. Тем не менее, из-за ослабления цепи и уменьшения угловой характеристики угол напряжения δ увеличивается с 17,157 до 40,08 градуса. Электрические параметры в послеаварийном режиме представлены на рисунке 6.

Таким образом, используя формулу (2), можно рассчитать критический угол напряжения по критерию динамической устойчивости (140 градусов). Следовательно, этот параметр угла может быть интегрирован в систему противоаварийной автоматики, реализующую управляющее воздействие с помощью специальной автоматики отключения нагрузки (САОН).

2.2. Снижение инерционной постоянной и применение управляющих воздействий

После определения анализируемого установившегося режима в исходном и послеаварийном режимах необходимо определить сценарий нарушения динамической устойчивости. При вращении всех синхронных генераторов в энергосистеме момент инерции достаточно велик для поддержания динамической устойчивости. Поэтому необходимо постепенно снижать момент инерции, заменяя математическую модель синхронных генераторов на

инверторную модель генерации, в параметрах которой момент инерции, естественно, отсутствует. В работах [4, 5] подробно описаны порядок и методология снижения момента инерции. В данной работе рассматриваются 4 сценария изменения значения момента инерции:

- 1) $H = 22$ с – все синхронные генераторы работают и подключены к сети;
- 2) $H = 10,78$ с – генераторы на станции 2 заменены;
- 3) $H = 8,76$ с – генераторы на станции 1 заменены;
- 4) $H = 5,68$ с – генератор на станции 3 110 кВ заменен.

Определив момент инерции энергосистемы, при котором нарушается динамическая устойчивость, возникает необходимость применения управляющих воздействий к объектам электрической сети для предотвращения этого нарушения. Управляющие воздействия формируются с помощью системы противоаварийной автоматики, включающей автоматическое дозирование управляющих воздействий. В качестве пускового элемента приняты регистрация факта отключения линии 220 кВ и значение угла напряжения δ . Если при аварийном отключении линии 220 кВ значение угла напряжения δ превышает критическое значение, рассчитанное СМЗУ, происходит отключение нагрузки от САОН на величину, достаточную для поддержания устойчивости. В данной работе рассматриваются величины отключения нагрузки 250 и 300 МВт.

2.3. Действия в симуляторе

В первую секунду моделирования происходит трёхфазное короткое замыкание на расстоянии 0,5% от расстояния линии 220 кВ между МАЭК ТЭС 220 кВ и ПС Бейнеу 220 кВ. Значение 0,5% от расстояния выбрано исходя из максимально возможной тяжести повреждения. Учитывая, что тип короткого замыкания трёхфазный, существует высокая вероятность возникновения данного типа повреждения на разъединителях линии (например, если после ремонта не будет снято стационарное заземление).

Далее срабатывает первая ступень дистанционной защиты, которая отключает выключатель на стороне МАЭК и подаёт сигнал быстрого телеотключения на сторону ПС Бейнеу по высокочастотным каналам автоматики. С учётом времени срабатывания контактов выходных реле защиты и расцепителя выключателя (масляного типа), время отключения повреждённой линии составляет 0,16 секунды.

	Object	Time (Cycles)	Time (Sec)	Enable	Object	Description	Comment
1	Line Station 3 220kV TO Substation 4 CKT 2	50,0	1,000000	CHECK	Branch '2' '1' '2'	FAULT 0,5 3PB SOLID	3 phase short circuit on 220kV transmission line
2	Line Station 3 220kV TO Substation 4 CKT 2	58,0	1,160000	CHECK	Branch '2' '1' '2'	OPEN BOTH	Line trip from Distance Protection 1st step
3	Load Station 3 220kV #1	81,0	1,620000	CHECK	Load '2' '1'	SET Load 300 MW	SLSA 250 MW

Рисунок 7 – Моделирование действий при отключении нагрузки 250 МВт

Transient Contingency Elements							
Insert		Clear All		Insert Apply/Clear/Open		Time Shift (seconds) 0,000	
Records Set Columns Options							
	Object Pretty	Time (Cycles)	Time (Sec)	Enable	Object	Description	Comment
1	Line Station 3 220kV TO Substation 4 CKT 2	50,0	1,000000	CHECK	Branch '2' '1' '2'	FAULT 0,5 3PB SOLID	3 phase short circuit on 220kV transmission line
2	Line Station 3 220kV TO Substation 4 CKT 2	58,0	1,160000	CHECK	Branch '2' '1' '2'	OPEN BOTH	Line trip from Distance Protection 1st step
3	Load Station 3 220kV #1	81,0	1,620000	CHECK	Load '2' '1'	SET Load 250 MW	SLSA 250 MW

Рисунок 8 – Моделирование действий при отключении нагрузки 300 МВт

На рисунках 7 и 8 показаны действия моделирования для сценариев сброса нагрузки 250 и 300 МВт после отключения линии 220 кВ. При моделировании нарушения устойчивости без применения управляющих воздействий угол напряжения δ достигает значения 140 градусов через 0,46 секунды после отключения линии. Таким образом, на 1,62 секунде моделирования реализуются два сценария сброса нагрузки для предотвращения неустойчивости. Предполагается, что сброс нагрузки 250 МВт недостаточен для предотвращения неустойчивости, в то время как сброс нагрузки 300 МВт способствует поддержанию переходной устойчивости.

3. Результаты и обсуждение

На рисунке 9 представлены колебания угла напряжения в рамках четырёх сценариев, определённых в соответствии с Методологией, с уменьшением значений момента инерции. Первые три сценария обеспечивают сохранение динамической устойчивости энергосистемы. Графики показывают, что при моменте инерции 22 с колебания угла напряжения демонстрируют устойчивое поведение с допустимыми отклонениями. При уменьшении момента инерции до 10,78 и 8,76 с наблюдается значительное увеличение амплитуды отклонений угла напряжения, а также смещение экстремума как по амплитуде, так и по времени его достижения. Это свидетельствует о том, что с уменьшением момента инерции амплитуда максимального отклонения угла напряжения увеличивается, а момент его достижения наступает раньше. В последнем сценарии, при моменте инерции 5,68 с, фиксируется потеря синхронизма, система переходит в асинхронный режим, при котором угол напряжения превышает 180° , не возвращаясь в устойчивое состояние.

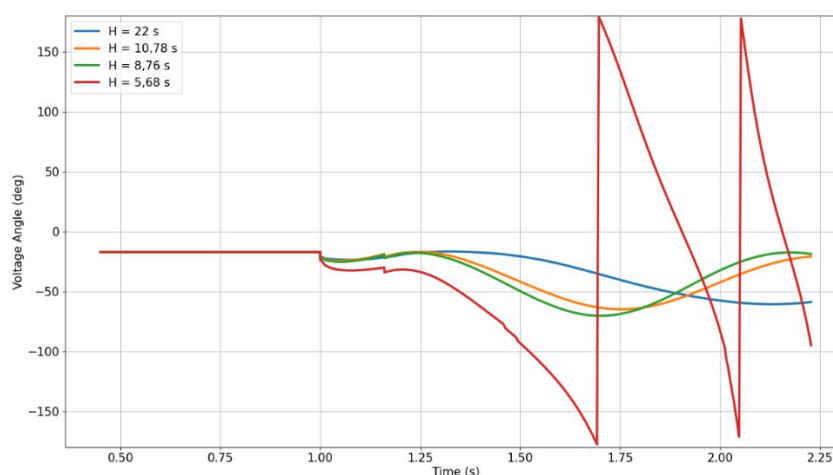


Рисунок 9 – Колебания угла напряжения с уменьшением величины постоянной инерции

На рисунке 10 представлены характеристики изменения угла напряжения с инерционной постоянной 5,68 с в условиях нарушения динамической устойчивости, а также при реализации мер противоаварийной автоматики, обеспечивающих отключение нагрузки 250 и 300 МВт на 1,62 с. Графики показывают, что отключение нагрузки 250 МВт оказалось недостаточным для компенсации избыточной кинетической энергии, накопленной в роторах генераторов в режиме короткого замыкания. В результате угол напряжения продолжает увеличиваться, достигая значения 180° , что свидетельствует о переходе системы в асинхронный режим. Отключение нагрузки 300 МВт, напротив, обеспечивает необходимый энергетический баланс: область торможения генератора в переходном процессе превышает область его ускорения. Это позволяет сохранить динамическую устойчивость системы, при этом угол напряжения стабилизируется и плавно переходит в новое устойчивое состояние.

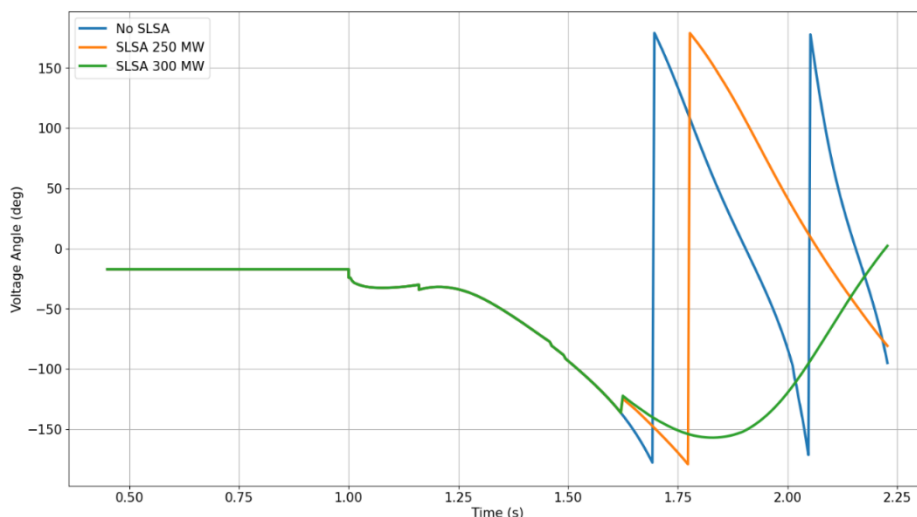


Рисунок 10 – Колебания угла напряжения с реализацией контрольных воздействий и без них

Результаты моделирования отражены в угловых характеристиках сети электропередачи, представленных на рисунке 11.

Согласно рисунку 11 (а), энергосистема включает в себя все синхронно работающие генераторы на ТЭЦ-1, ТЭЦ-2 и ТЭС. Общая постоянная инерции в этом сценарии составляет 22,26 с. В этой угловой характеристике δ_0 – угол напряжения в исходном режиме (17,157 градуса), а δ_1 – угол в послеаварийном режиме. При возникновении короткого замыкания на одной из линий 220 кВ угловая характеристика резко уменьшается и принимает вид II. Угол начинает увеличиваться до значения δ_2 – момента отключения короткого замыкания релейной защитой. После отключения характеристика принимает вид III, и угол, вследствие торможения синхронных генераторов, продолжает увеличиваться до момента, когда будет исчерпана вся кинетическая энергия вращения ротора, запасенная за время короткого замыкания (на угол δ_3). В этом случае, благодаря

достаточно большой постоянной инерции, сохраняется переходная устойчивость и угол возвращается к значению δ_1 .

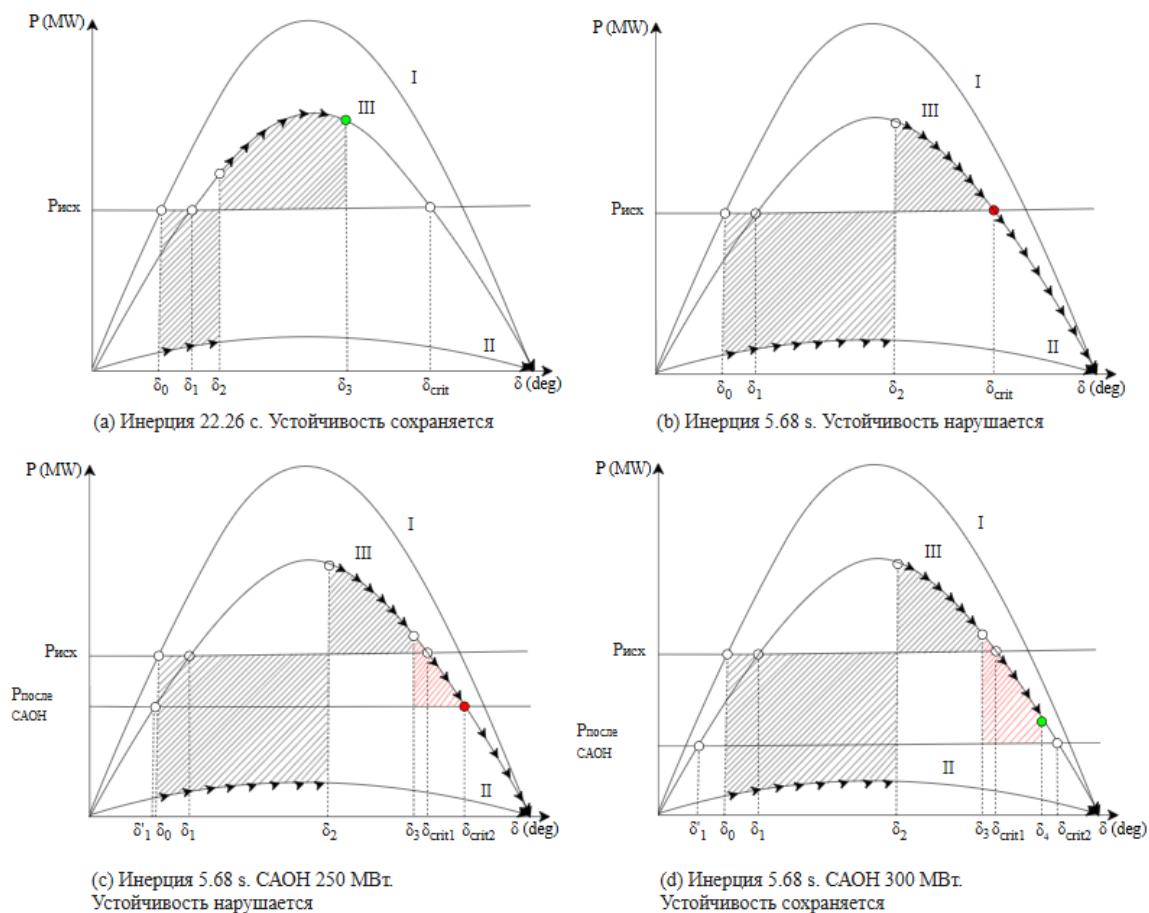


Рисунок 11 – Угловые характеристики агрегированных линий электропередачи для 4 сценариев

На (b) показано поведение углов на угловых характеристиках в сценарии, когда несколько синхронных генераторов были заменены на инверторные технологии, а общий момент инерции уменьшился до 5,68 с. В этом случае скорость изменения угла при коротком замыкании существенно возрастает из-за обратной пропорциональности моменту инерции системы. Следовательно, угол δ_2 принимает большее значение, что, в свою очередь, значительно расширяет область разгона генераторов и уменьшает запас области торможения. В результате запасенная кинетическая энергия становится слишком большой для данной электрической сети, а угол δ_3 превышает δ_{crit} и никогда не достигается, что приводит к возникновению асинхронного режима.

На рисунке (c) применено управляющее воздействие, отключающее фиксированную часть нагрузки с помощью специальной автоматики отключения нагрузки мощностью 250 МВт. Суть данного примера заключается в недостаточном объеме САОН и неизбежном возникновении асинхронного режима. При использовании САОН прямая $P_{исх}$ уменьшается до $P_{после САОН}$, тем

самым увеличивая критическое значение угла по критерию динамической устойчивости. Ключевым моментом является то, что САОН применяется при приближении δ_3 к первому критическому значению угла. Однако запасённая кинетическая энергия ускорения генераторов настолько велика, что объёма сброса нагрузки САОН недостаточно, и угол δ_3 всё ещё превышает новое значение δ_{crit2} .

На рисунке 7 (d) показано применение сброса нагрузки 300 МВт от аварийной автоматики. В этом случае переходный процесс до угла δ_3 идентичен предыдущим вариантам с неустойчивостью. Однако в момент δ_3 отключается большая нагрузка, и, таким образом, $P_{\text{после САОН}}$ падает значительно ниже, тем самым увеличивая критическое значение угла динамической устойчивости. Угол увеличивается до значения δ_4 , которое не достигает критического значения и после нескольких периодов колебаний возвращается в установившийся режим. Область, ограниченная δ_3 , δ_3 , угловой характеристикой III и $P_{\text{после САОН}}$, представляет собой дополнительную область торможения синхронных генераторов, которая накладывается на предыдущую область торможения, ограниченную δ_2 , δ_2 , угловой характеристикой III и $P_{\text{исх}}$, и их сумма начинает превышать область ускорения генераторов при коротком замыкании.

Согласно сценарию, на рисунке 7 (d), показана возможность использования СМЗУ для определения критических углов для обеспечения устойчивости переходного процесса с учетом всех режимно-балансовых условий, состава генераторов и их инерционности, и использования результатов этих расчетов в пусковых органах противоаварийной автоматики, что позволяет энергосистеме сохранять устойчивость и избегать каскадных отключений и обесточивания.

4. Заключение

В условиях стремительного роста доли возобновляемых источников энергии, не обладающих инерционностью, проблема обеспечения динамической устойчивости энергосистем становится особенно актуальной. В настоящем исследовании подчеркивается необходимость разработки новых методов противоаварийного управления, поскольку традиционные подходы с фиксированными пороговыми значениями параметров не обеспечивают требуемого уровня надежности при снижении инерционности системы.

Новизна работы заключается в разработке и внедрении адаптивного алгоритма автоматизации противоаварийного управления на основе данных, получаемых в режиме реального времени с использованием системы мониторинга запаса устойчивости. Предложенный подход обеспечивает динамическое определение критических углов напряжения в послеаварийных режимах, что позволяет оперативно корректировать параметры аварийного воздействия с учетом текущего состояния энергосистемы и уровня инерционности.

Практическая значимость полученных результатов подтверждается на примере моделирования переходных процессов в Мангистауской энергосистеме.

Анализ показал, что при высоких значениях инерционной постоянной система сохраняет динамическую устойчивость. Однако с уменьшением момента инерции наблюдается существенное увеличение амплитуды и скорости колебаний угла напряжения, что приводит к потере синхронизации генератора при критически малых значениях момента инерции ($H = 5,68$ с). Важным результатом является демонстрация эффективности адаптивного противоаварийного управления, включающего дозированное автоматическое отключение нагрузки объемом 300 МВт, активируемое на основе расчёта критического угла, что позволяет восстановить устойчивость системы и избежать перехода в асинхронный режим. При этом меньший объём отключения нагрузки (250 МВт) оказался недостаточным, что указывает на необходимость точной настройки параметров управления с помощью динамического мониторинга.

Однако предложенная концепция не может не нести в себе риски и недостатки, которые необходимо учитывать и устранять. К ним относятся:

1) Сбой в работе SCADA и WAMS – приводит к некорректному расчёту СМЗУ и автоматического реагирования.

2) Проблемы с выбором дозировки управляющих воздействий – в одних режимах требуется отключение большей нагрузки, в других – меньшей.

3) Автоматическое повторное включение (АПВ) может как улучшить, так и ухудшить устойчивость, если короткое замыкание не деионизировалось при первом отключении линии.

4) Реверсирование потока мощности – при отключении слишком большой нагрузки происходит реверсирование потока мощности, что может нарушить статическую устойчивость в обратном направлении. В этом случае, помимо отключения нагрузки, необходимо предусмотреть отключение генерации для балансировки потока мощности по межсистемным линиям в устойчивом режиме.

В целом, представленная методика позволяет снизить вероятность чрезмерного отключения нагрузки, тем самым повышая экономичность и надёжность энергосистемы. Интеграция данных о состоянии системы в режиме реального времени, расчет запаса устойчивости и адаптивное управление аварийными воздействиями формируют современную и эффективную основу для обеспечения динамической устойчивости в энергосистемах с высокой степенью интеграции возобновляемых источников энергии. Данный подход актуален и практически применим для предотвращения каскадных отказов и масштабных аварийных ситуаций в современных электроэнергетических системах.

Список литературы

1. Беркович М.А., Гладышев В.А., Семенов В.А. (1991). *Автоматика энергосистем*. –М.: Энергоатомиздат.
2. Овчаренко Н.И. (2000). *Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем: Учебник для вузов / Под ред. А.Ф. Дьякова*. –М.: НЦ ЭНАС.
3. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. (1990). *Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах*. –М.: Энергоатомиздат.

4. Aisayev, Y., Tergemes, K., Zhauyt, A., Sheryazov, S., Bakenov, K. (2024). The Impact of Replacing Synchronous Generators with Renewable-Energy Technologies on the Transient Stability of the Mangystau Power System: An Introduction to Flexible Automatic Dosage of Exposures. *Energies*, 17, 2314. <https://doi.org/10.3390/en17102314>

5. Айсаев, Е.С., Тергемес, К.Т., Жауыт, А., Диярова, Л.Д. Исследование влияния инерционной постоянной энергосистемы Мангистауской области на динамическую устойчивость. Вестник Алматинского Университета Энергетики и Связи, 2024, 4(67). DOI 10.51775/2790-0886_2024_67_4_16

6. Александров, А.С., Максименко, Д.М., Михайленко, А.Ф., Неуймин, В.Г. Развитие системы мониторинга запасов устойчивости с контролем динамической устойчивости для учета действия противоаварийной автоматики. Известия НТЦ Единой Энергетической Системы, 2017, №1(76). УДК 621.311

7. Тохтибакиев, К.К., Гунин, А.М., Васильев, Д.С., Михалкова, Е.Г. Разработка и исследования алгоритмов оценки запасов устойчивости для системы мониторинга и прогнозирования режимной надежности электрических сетей с дефицитом мощности. Вестник Алматинского Университета Энергетики и Связи, 2024, 3(66). DOI 10.51775/2790-0886_2024_66_3_6

8. Соколова, А. Что такое СМЗУ? Энергия без границ, 2023, №5(82).

9. Лисицын, А. Система мониторинга запасов устойчивости (СМЗУ) как активный элемент управления режимам и уставками ПА. Доклад НТЦ Единой Энергетической Системы, 2024

УДК 621.31

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ПАУ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ИНТЕГРАЦИИ ВИЭ В ЮЖНОЙ ЗОНЕ ЕЭС РК

Ахмедов Д.Е., Бектимиров А.Т., Збырня Д.А.

Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г.
Алматы, Казахстан

e-mail: da.akhmedov@aes.kz, a.bektimirov@aes.kz, da.zbyrnya@aes.kz

1 Введение

В последние годы Республика Казахстан активно разрабатывает и реализует стратегию энергетического перехода, в которой ключевая роль отводится возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) и системам накопления энергии (СНЭ). В «Концепции развития электроэнергетической отрасли Республики Казахстан до 2035 года» [1] предусматривается значительное наращивание доли ВИЭ и обязательное включение накопителей энергии в архитектуру электросетей

с переменной генерацией, что необходимо для обеспечения балансовой устойчивости и надёжности системы.

Согласно поручению Главы государства о достижении углеродной нейтральности к 2060 году, Казахстан планирует достичь 15-процентной доли ВИЭ от общей установленной мощности к 2030 году и 50-процентной доли – к 2050 году. При этом, «для создания условий для беспрепятственной интеграции ВИЭ в ЕЭС РК» ожидается увеличение доли накопителей энергии до 30% от общей установленной мощности.

Исходя из вышесказанного, Единая энергетическая система РК и в особенности ее Южная Зона по характеристикам приближается к энергосистемам с высокой долей интеграции возобновляемых источников (ВЭС мощностью 100 МВт, совместно развиваемая с СРПН; СЭС мощностью 10 МВт, строительство которой ведется ТОО «Хорса»; ВЭС мощностью 1 ГВт, инвестируемая компанией Masdar) и силовой электроники, которые в зарубежной классификации получили название «Энергосистем с двойным высоким уровнем проникновения» («Dual high-penetrated power systems»). Данный термин будет использован в настоящей статье для описания характеристик таковых энергосистем.

Влияние характеристик энергосистем с двойным высоким уровнем проникновения на ее устойчивость [2,3] приводит к низкой эффективности существующих принципов противоаварийного управления. Данный факт навязывает необходимость разработки адаптивных систем ПАУ с элементами прогнозирования выходной мощности возобновляемых источников, контроля состояния СНЭ и оценки динамического состояния энергосистемы с помощью РМУ в каждый момент времени.

2 Характеристики энергосистем с высокой долей интеграции ВИЭ и СНЭ

По сравнению с традиционной энергосистемой, основанной на классических турбогенераторах (ТГ), индивидуальные характеристики генераторов, подключаемых через силовые электронные преобразователи (солнечные панели и ветряные турбины) а также других силовых электронных устройств в значительной степени определяются [2]:

- доминированием управления посредством преобразователя;
- разной по времени динамической реакцией на возмущения;
- малой инерцией;
- слабой устойчивостью к отклонениям частоты и напряжения;
- малым значением тока короткого замыкания;
- выраженными нелинейными характеристиками;
- прерывистостью входных ресурсов.

Доминирование управления посредством преобразователя

Управление силовым электронным преобразователем играет ключевую роль в формировании характеристик оборудования. Присоединение устройств к сети осуществляется через несколько контуров управления (внешний, внутренний,

ШИМ). Синхронизация с сетью обеспечивается петлёй фазовой автоподстройки частоты (phase-locked loop – PLL) и аналогичными механизмами. Таким образом, именно алгоритм управления, а не физические свойства устройства, определяет его характеристики в установившемся, динамическом и аварийном режимах [2].

Разное время динамической реакции на возмущения

Внутреннее многоуровневое управление преобразователей вызывает взаимосвязанные динамические процессы на разных временных промежутках. Например, в ветровой турбине с двойным питанием (double-fed induction generator – DFIG) управляемые процессы переменного напряжения, постоянного напряжения и механической скорости имеют соответственно постоянные времена 10 мс, 100 мс и 1 с. Это приводит к широкополосной реакции на возмущения сети и новым проблемам устойчивости [2].

Низкая инерция

Наличие промежуточного элемента в виде силового преобразователя приводит к тому, что входная мощность первичного двигателя практически развязана от выходной электромагнитной мощности на стороне сети. Устройство не обладает традиционной инерционной реакцией, основанной на вращательной кинетической энергии. Элементы накопления энергии (индуктивность/ёмкость) слабо способны поглощать и отдавать энергию после возмущения и противостоять отклонениям частоты. Например, инерционная постоянная турбогенератора мощностью 1000 МВт составляет около 8-10 секунд, тогда как для солнечной станции эквивалентной мощности она практически равна нулю [2].

Слабая устойчивость к отклонениям частоты и напряжения

Силовое электронное оборудование в энергосистемах с двойным высоким уровнем проникновения отличается низкой перегрузочной способностью и недостаточной устойчивостью к отклонениям частоты и напряжения по сравнению с традиционными синхронными генераторами, которые обладают естественной первичной частотной регуляцией и возможностью регулирования возбуждения для поддержания напряжения на выходе. У генераторов, подключённых через преобразователи, эти свойства отсутствуют: их способность к регулированию частоты и напряжения определяется алгоритмами управления и допустимыми токами полупроводниковых элементов. Сами силовые электронные компоненты, например транзисторы IGBT, проектируются с номиналами, минимально необходимыми для выдерживания небольших колебаний, что снижает стоимость оборудования, но делает его особенно чувствительным к перенапряжениям и частотным отклонениям. Так, предельные значения частоты и напряжения для ветряных турбин составляют 50,2 Гц или 1,1 о.е., в то время как у традиционных турбогенераторов эти показатели выше – 51,5 Гц или 1,3 о.е. В результате при крупных колебаниях частоты или напряжения генераторы, подключённые через преобразователи, отключаются от сети, что вызывает уменьшение общей вырабатываемой мощности и негативно влияет на устойчивость энергосистемы [2].

Малое значение тока короткого замыкания

По сравнению с традиционными турбогенераторами силовое электронное оборудование характеризуется низким током короткого замыкания. У таких устройств отсутствует какой-либо переходный процесс, свойственный синхронным машинам при аварийном режиме, поэтому начальный ток короткого замыкания обычно не превышает 1,5 о.е. и быстро спадает вследствие высокого внутреннего сопротивления и возможности быстрого управления опорным током. Амплитуда и длительность тока КЗ оказываются значительно меньше, чем у турбогенераторов, что создаёт дополнительные трудности для работы устройств управления и релейной защиты и требует пересмотра традиционных подходов к обеспечению устойчивости и безопасности энергосистемы [2].

Выраженные нелинейные характеристики

По сравнению с традиционными турбогенераторами у генераторов, подключённых через преобразователи и других силовых электронных устройств гораздо более выражены нелинейные характеристики. Эти нелинейности обусловлены, прежде всего, дискретным переключением силовых ключей, а также особенностями систем управления: срабатыванием ограничителей, насыщением при перегрузке, переходом между различными режимами управления и защиты. Например, при изменении условий работы (поддержание активной/реактивной мощности P/Q , регулирование напряжения/частоты V/f) происходит последовательное переключение стратегий управления, что вносит дополнительные нелинейные эффекты. Всё это приводит к появлению сложных, зачастую резких переходных процессов, которые могут изменять динамическое поведение оборудования и влиять на устойчивость энергосистемы в целом [2].

Прерывистость входных ресурсов

В отличие от традиционных турбогенераторов, мощность которых определяется управляемыми и относительно стабильными первичными источниками энергии (например, уголь, газ, вода), генераторы, подключённые через преобразователи, работают на основе возобновляемых ресурсов, зависящих от природных и климатических факторов, таких как скорость ветра и солнечная радиация. Эти параметры непрерывно изменяются во времени, а значит и вырабатываемая мощность носит прерывистый, стохастический характер. Несмотря на то, что прогнозирование ветровой и солнечной генерации возможно, оно всегда сопровождается существенной неопределённостью, что затрудняет планирование режимов, поддержание баланса мощности и обеспечение устойчивости энергосистемы с двойным высоким уровнем проникновения [3].

3 Описание предлагаемого адаптивного алгоритма ПАУ в энергосистемах с двойной высокой степенью проникновения

Предлагаемый адаптивный алгоритм противоаварийного управления основан на отклике энергосистемы на те или иные возмущения (response-based algorithm) [4]. Он использует гибридное распределение вычислений – онлайн и

офлайн – для анализа текущего состояния сети и выработки эффективных управляющих действий. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 1. Разберем каждую структурную составляющую отдельно.

Оценка динамического состояния

Оценка динамических состояний должна выполняться с помощью устройств фильтрации, позволяющих эффективно фильтровать шумы измерений PMU на уровне локальных генераторов. Это позволяет точно оценивать угол ротора и скорость генераторов. Эти параметры необходимы для прогноза устойчивости и расчета оставшегося времени.

Прогнозирование неустойчивого режима

Для оценки устойчивости должен использоваться интеллектуальный классификатор, обученный на данных моделирования. Сравнение различных методов (k-NN, ANN, SVM и Decision Trees) показало, что наилучший результат по точности и скорости достигается с использованием дерева решений (Decision Trees), который обеспечивает высокую точность при малом числе входных выборок [4].

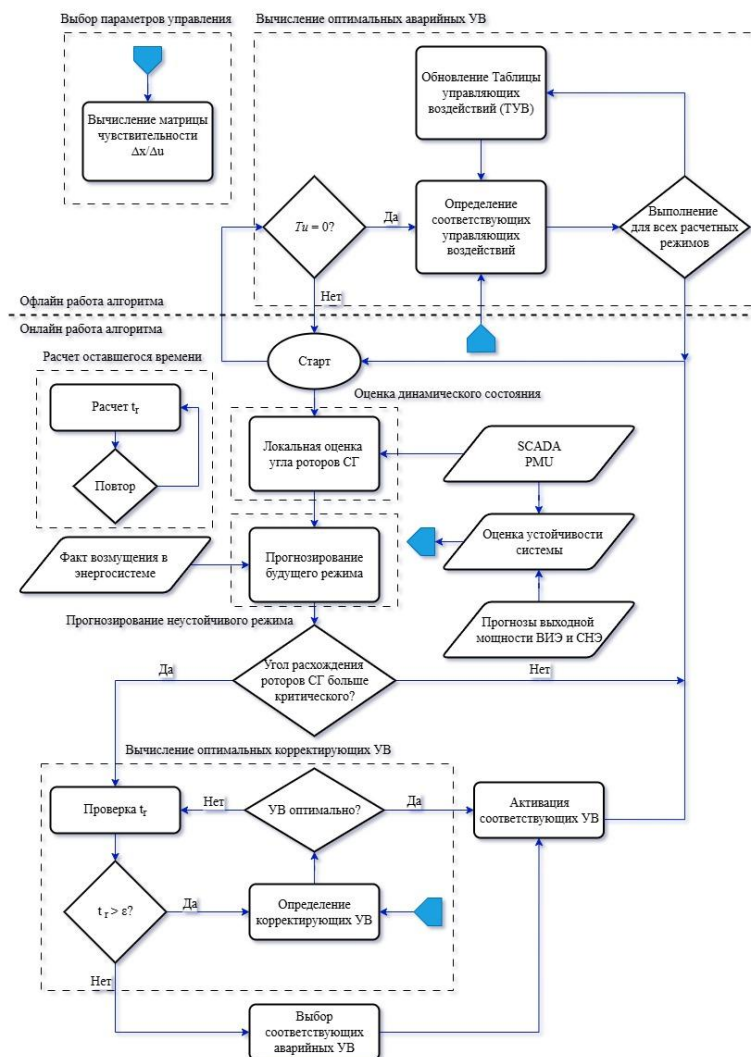


Рисунок 1 – Блок-схема предлагаемого адаптивного алгоритма ПАУ

Чтобы определить устойчивость после непредвиденных обстоятельств, мы прибегаем к показателю временной устойчивости, называемому угловым запасом (Angle Margin) [4], который определяется как

$$AM = \frac{360^\circ - \delta_{max}}{360^\circ + \delta_{max}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где δ_{max} – максимальное угловое расхождение между любыми двумя генераторами после возмущения.

Критическое значение угла δ_{cr} обычно принимается $+90^\circ$.

Расчет оставшегося времени

Оценивается оставшееся время до достижения критического угла между машинами, при превышении которого система считается неустойчивой. Это время используется как критерий: если его недостаточно для онлайн-вычислений, активируются заранее сохранённые управляющие действия.

Оставшееся время до потери устойчивости t_r рассчитывается на основе модели генератора второго порядка [4]:

$$\dot{\delta}(t) = \omega(t), \quad (2)$$

$$\omega(t) \cdot J \cdot \dot{\omega}(t) + \omega^2(t) \cdot D = RR \cdot (t - t_0) + P_{m0} - P_0, \quad (3)$$

где J – момент инерции генератора; D – постоянная демпфирования; ω – скорость вращения ротора генератора; δ – угол ротора генератора; P_{m0}, P_0 – начальные потребляемая и выходная мощности; RR – скорость изменения несоответствия мощности.

Для оценки времени t_r до достижения критического угла используется аналитическое решение [4]:

$$\delta(t) = \frac{RR \cdot t^3}{2 \cdot J \cdot \omega} + \frac{t^2 \cdot (P_{m0} - P_0 - RR \cdot t_0 - D \cdot \omega^2)}{2 \cdot J \cdot \omega} + t \cdot \omega_0 + \delta_0. \quad (4)$$

Наименьший положительный корень t , при котором $\delta(t) = \delta_{cr}$, принимается за t_r .

Выбор параметров управления

На этапе оффлайн-моделирования проводится анализ чувствительности системы к различным управляющим воздействиям. Матрица чувствительности $\Delta x / \Delta u$ используется для выбора наиболее эффективных параметров управления (отключение генераторов (ОГ) и отключение нагрузки (ОН)).

Вычисление оптимальных управляющих воздействий

В зависимости от ситуации предлагаемый алгоритм применяет:

– аварийное управление: заранее рассчитанное и сохранённое в ТУВ;

– корректирующее управление: рассчитывается онлайн при наличии достаточного запаса времени.

Оптимизация проводится с учетом нескольких критериев: отклонения частоты и напряжения, величина углов роторов и стоимость управляющих воздействий.

Целевая функция [4]:

$$\min (w_1 \sum |\Delta\omega|^2 + w_2 \sum |\Delta V|^2 + w_3 \cdot \max(\Delta\delta) + w_4 \cdot Cost_{GS} + w_5 \cdot Cost_{LS}), \quad (5)$$

где $\Delta\omega$ – отклонение скорости ротора; ΔV – отклонение напряжения; $\Delta\delta$ – угловое отклонение; GS/LS – отключение генераторов/нагрузки.

Онлайн-оптимизация проводится при наличии достаточного запаса времени $t_r > \varepsilon$, иначе используется последнее аварийное управление из ТУВ.

4 Заключение

Южная Зона ЕЭС РК как наиболее перспективный регион по развитию возобновляемых источников энергии и, соответственно, систем накопления энергии обуславливает необходимость в пересмотре принципов противоаварийного управления. Кратко описанные в главе 2 характеристики энергосистем с высокой степенью интеграции ВИЭ и силовой электроники показывают характер проблем, которые подлежат решению в ближайшие годы. Краткое описание предлагаемого адаптивного алгоритма ПАУ, приведенное в главе 3, нацелено на представление альтернативных адаптивных способов противоаварийного управления как одной из концепций решения указанных проблем. Дальнейшее исследование будет направлено на апробацию такого рода алгоритмов на моделях тестовых и реальных энергосистем.

Список литературы

1. Концепция развития электроэнергетической отрасли Республики Казахстан до 2035 года
2. Jan Shair, Haozhi Li, Jiabing Hu, Xiaorong Xie, «Power system stability issues, classifications and research prospects in the context of high-penetration of renewables and power electronics», Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 145, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111111>
3. Muhammad Khalid, «Smart grids and renewable energy systems: Perspectives and grid integration challenges, Energy Strategy Reviews», Volume 51, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101299>
4. J. A. Lopez and C. -n. Lu, «Adaptable System Integrity Protection Scheme Considering Renewable Energy Sources Output Variations» in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 35, no. 5, pp. 3459-3469, Sept. 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2020.2975280

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ СОЛНЕЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ СЭС В ЮКО

Апостол С.Ф., Михалкова Е.Г.

Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы,
Казахстан

E-mail: se.apostol@aes.kz, e.mikhalkova@aes.kz

Аннотация. В Казахстане в ближайшие десятилетия планируется существенное увеличение доли возобновляемых источников энергии: до 15 % к 2030 году и до 50 % к 2050 году. Особенно актуально это для южных регионов страны, где наблюдается дефицит электроэнергии. В данной работе рассмотрена задача выбора оптимального месторасположения солнечной электростанции на Юге Казахстана на основе оценки солнечного потенциала. Для анализа применялись данные программных комплексов Google Earth и PVsyst, кадастровой карты Республики Казахстан, а также схемы электрических сетей напряжением 1150–500–220–110 кВ. Авторами предложена методика определения наиболее эффективного варианта размещения станции с учетом комплекса факторов, влияющих на надежность и экономическую эффективность объекта.

Ключевые слова: солнечная энергия, солнечный потенциал, оценка потенциала, выработка электроэнергии, солнечная электростанция.

Введение

В энергосистеме Казахстана по-прежнему сохраняется ряд проблем, решение которых требует комплексного подхода. Одной из наиболее актуальных является дефицит электроэнергии в Южной зоне, что компенсируется перетоками мощности из Северной части страны. По данным АО «KEGOC» на начало 2025 года, установленная мощность всех электростанций Казахстана составила 25 314,2 МВт, располагаемая — 21 034,6 МВт. При этом распределение производства и потребления электроэнергии по зонам остаётся неравномерным: в Северной зоне сосредоточено свыше 60 % генерации, тогда как в Южной наблюдается структурный дефицит.

В 2024 году совокупное потребление электроэнергии в стране составило около 120 млрд кВт·ч, из которых на Северную зону пришлось 75 335,3 млн кВт·ч (62,8 %), на Южную — 28 376,9 млн кВт·ч (23,6 %), а на Западную — 16 283,3 млн кВт·ч (13,6 %). Сопоставление этих показателей с установленными мощностями демонстрирует недостаточность энергетического потенциала в Южной зоне, что делает её зависимой от межзональных перетоков и усиливает актуальность строительства новых генерирующих объектов.

Дополнительным вызовом для энергетической отрасли является необходимость сокращения выбросов парниковых газов в соответствии с Парижским соглашением, ратифицированным Казахстаном. К 2030 году стране предстоит снизить выбросы до 328,3 млн тонн, а к 2050 году — до 193,1 млн тонн, что требует ускоренного перехода от традиционных углеродоёмких станций к экологически чистым источникам.

В этой связи одним из наиболее перспективных решений становится развитие солнечной энергетики и строительство солнечных электростанций в южных регионах, которые обладают высоким уровнем солнечной инсоляции и способны обеспечить дефицитный регион устойчивой «зелёной» электроэнергией.

1 Рост эксплуатации возобновляемых источников энергии

В Республике на 2025 год эксплуатируется 154 объекта электроэнергетики, использующих ВИЭ, суммарная установленная мощность которых достигает 3,08 ГВт, к ним относятся 50 ветровых электрических станций суммарной мощностью в 1,57 ГВт, 35 гидроэлектростанций – 0,28 ГВт, солнечные электростанции – 1,22 ГВт и биоэлектростанции вырабатывающие менее 300 МВт.

По данным АО «KEGOC», в 2024 году объём выработанной электроэнергии в Республике Казахстан составил примерно 117,9 млрд кВт·ч, из которых доля возобновляемых источников (ВИЭ) — 7,581 млрд кВт·ч, что даёт 6,43 % от общего объёма. По сравнению с 2023 годом, когда ВИЭ произвели около 6,7169 млрд кВт·ч, это означает рост более чем на 13,6 %.

Планируется продолжить расширение сектора: ввод новых станций ВИЭ, аукционные торги на выставяемую мощность, меры поддержки со стороны Правительства для стимуляции «чистой» генерации.

Курс на систематизированную поддержки развития ВИЭ в Республике Казахстан взят в 2009 году. Система поддержки разработана с учетом лучших международных практик. Таким образом, сегодня на территории Казахстана действует система, позволяющая развивать солнечную энергетику.

2 Критерии выбора и оценка места размещения СЭС

Для выбора расположения солнечной электрической станции учтем следующие критерии:

- потенциал производства фотоэлектрической энергии (солнечную инсоляцию);
- близкое расположение к дорожным и электроэнергетическим инфраструктурам, таким как подстанции и высоковольтные линии;
- наличие свободных земельных участков;
- равномерность рельефа местности.

Для проектирования сетевых солнечных электростанций применяется свод правил РК 4.04–113–2014 утверждённый 07.01.2015, в котором описаны

основополагающие принципы проектирования, в том числе и выбор площадки под строительство станции. Приоритетами при проектировании и строительстве станции является энергетическая надежность и экономическая выгода.

Однако, существует ряд рекомендаций, соблюдение которых повышающих эффективность будущих станций. Так, например, расположение СЭС вблизи с высоковольтной ЛЭП или ПС снижают потери электроэнергии и расход кабелей или проводов.

В правилах акцентируется внимание на анализе солнечного потенциала местности, оказывающего существенное влияние на вырубку электроэнергии солнечными электрическими станциями. Солнечная инсоляция, то есть количество солнечной энергии, падающей на квадратный метр, влияет на коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) СЭС. В настоящее время уровень инсоляции можно определить дистанционно, с помощью различных программных комплексов.

При выборе участка для установки фотоэлектрических модулей также важно учитывать наличие автомобильных дорог и близость населённых пунктов. Наиболее выгодным вариантом считается расположение рядом с железнодорожной станцией, так как это снижает затраты на доставку оборудования и, соответственно, влияет на сроки окупаемости и уровень прибыли.

Ключевым условием является использование свободных земельных участков либо таких, которые возможно выкупить для дальнейшего строительства. Кроме того, в своде правил отдельно подчёркивается необходимость размещения солнечных электростанций на ровной местности.

Для определения наиболее потенциально-эффективного в выработке электроэнергии месторасположения площадки для строительства СЭС согласно ранее перечисленным критериям был произведен выбор пяти подходящих участков земли. Основополагающим критерием выбора места для станции является минимизация расстояния до потребителя, однако, в нашем случае станция сетевая, следовательно, оценивается длина линии, соединяющей станцию с системой.

Для подключения солнечной электрической станции был выбран первый вариант — подстанция Абай-Базар 110 кВ, расположенная в Сарыагашском районе. Она является узловой и соединяет подстанцию ЛГНС-2 110 кВ с подстанцией Полторацкое 110 кВ и Шадринской ГЭС. Примерное расстояние от проектируемой СЭС до ПС Абай-Базар 14,2 км. Добавление генерирующей мощности в этом узле позволит разгрузить линии электропередачи. Вторым вариантом была выбрана подстанция Коксарай 110 кВ, расположенная в Отрарском районе, является проходной и соединяет подстанцию Шаульдер 110 кВ с подстанцией Ак-тобе. Расстояние от проектируемой СЭС с учётом рельефа местности в данном варианте будет равно 13,6 км. Третий вариант — подстанция Шолаккорган 220 кВ в Сузакского района, являющаяся узловой и соединенная с подстанциями Кентау 220 кВ, Жанатас 220 кВ, ТФ Уранэнерго 110 кВ, а также ЮКСЭС. В данном случае СЭС будет отдалена от станции на 17,1 км (Рис. 1).



Рис. 1 – Карта ЮКО с рассматриваемыми местами размещения СЭС

Так же при выборе места было определено наличие свободной земли, оцениваемое данными кадастровой карты РК (Рис. 2). С целью повышения объективности оценки потенциально возможной выработки электроэнергии принято ограничение по площади. Исходя из этого были выбраны подходящие участки земли с одинаковой площадью.

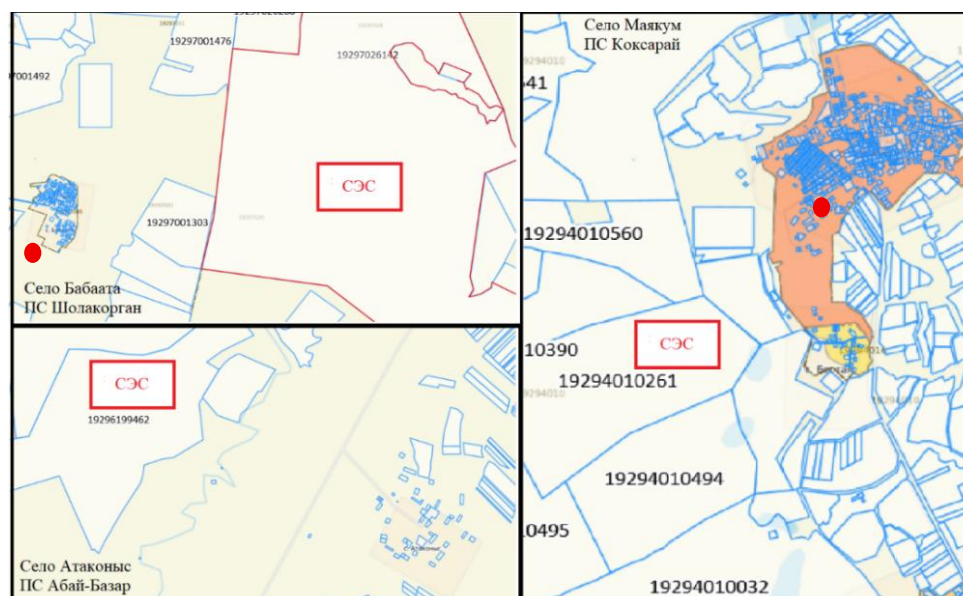


Рис. 2 - Фрагменты кадастровой карты, отображающие варианты размещения площадок СЭС

Первый участок расположен в 4,3 км восточнее от Села Атакомыс в Сарыагашском районе Южно-Казахстанской области страны. Для второго выбран участок в 1,5 км от Села Маякум Отрарского района. Третий расположен на северо-западе от Села Атакомыс в 3,4 км от жилых сооружений.

Следующим шагом является сравнение солнечного потенциала выбранных участков и расчет удельной выработки электроэнергии в год. На сегодняшний день существует множество карт солнечной инсоляции и программных комплексов для проектирования солнечных электрических станций, предназначенных в том числе и для получения показателя инсоляции по заданным координатам.

Проверка рельефа местности выбранных участков выполнена посредством применения база данных программного комплекса Google Earth. Построены профили, определяющие средний и максимальный уклоны каждого участка земли, результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Максимальный угол наклона площадок СЭС.

№ Вар-та	Средний уклон, %	Макс. уклон, %	Макс. угол наклона, °
1	1,4	3,7	2,1
2	0,8	2,6	1,5
3	1,2	3,9	2,2

Для определения солнечного потенциала был использован ресурс PVGIS, доступный в ПО PVSyst.

Подробнее рассмотрим получение данных солнечной инсоляции и расчет потенциальной выработки электроэнергии на примере первого участка, расположенного вблизи подстанции Абай-Базар. Получение значений солнечной инсоляции в программе PVSyst осуществляется по координатам участка, для первого варианта – северная широта $41^{\circ}14'23''$ (41.1519361°), восточная долгота $68^{\circ}38'49''$ (68.2454861°) (Рис. 3).

Таким образом, получены показатели солнечной радиации по месяцам и за год. В таблице 2 приведены значения инсоляции для сравниваемых вариантов.

Таблица 2. Данные инсоляции PVGIS для вариантов размещения СЭС.

№	Координаты	Ближайшая ПС	Вт/м ²	кВт·час/м ² за год
1	$41^{\circ}14'23''$ $68^{\circ}38'49''$ В	Абай-Базар	187	1 740
2	$42^{\circ}44'30''$ $68^{\circ}08'03''$ В	Коксарай	184,2	1 689
3	$43^{\circ}47'50''$ $69^{\circ}14'23''$ В	Шолаккорган	182,3	1 650

Первый вариант месторасположения СЭС имеет наибольший показатель солнечной инсоляции – 187,0 Вт/м².

Был произведен расчет максимальной установленной мощности СЭС. Для этого необходимо знать размеры и конфигурацию солнечной электростанции.

Площадь участков всех вариантов была принята одинаковой – 40 Га, в среднем соотношение сторон выбранных участков составило 90:54. Для объективности сравнения была использована одинаковая конфигурация, состоящая из фотоэлектрических столов, на которых размещается 50 модулей LR-66HPH 500 Вт в несколько рядов. Соединение панелей между рядами последовательное, таким образом от более чем 1000 столов отходило два положительных и два отрицательный кабеля. Размеры фотоэлектрического стола составили 35×5 метра. В результате расчета получено значение максимального количество фотоэлектрических столов, равное 1400 шт. Максимальная установленная мощность для каждого варианта размещения станции составило 35 МВт (Рис 3).

Рис. 3 – Конфигурация СЭС

В результате расчета выработка электроэнергии в год для первого варианта, вблизи подстанции Абай-Базар, составила 1740 МВт·час.

Исходя из расчетных данных приведенных в наиболее потенциально-эффективным по выработке электроэнергии является первый вариант размещения площадки под строительство СЭС – вблизи села Атаконьс с выработкой в 34 550 тыс МВт·час за год. Минимальное значение вырабатываемой электроэнергии у третьего варианта – вблизи села Маякум, составляющее 32 320 тыс. МВт·час (Рис. 4).

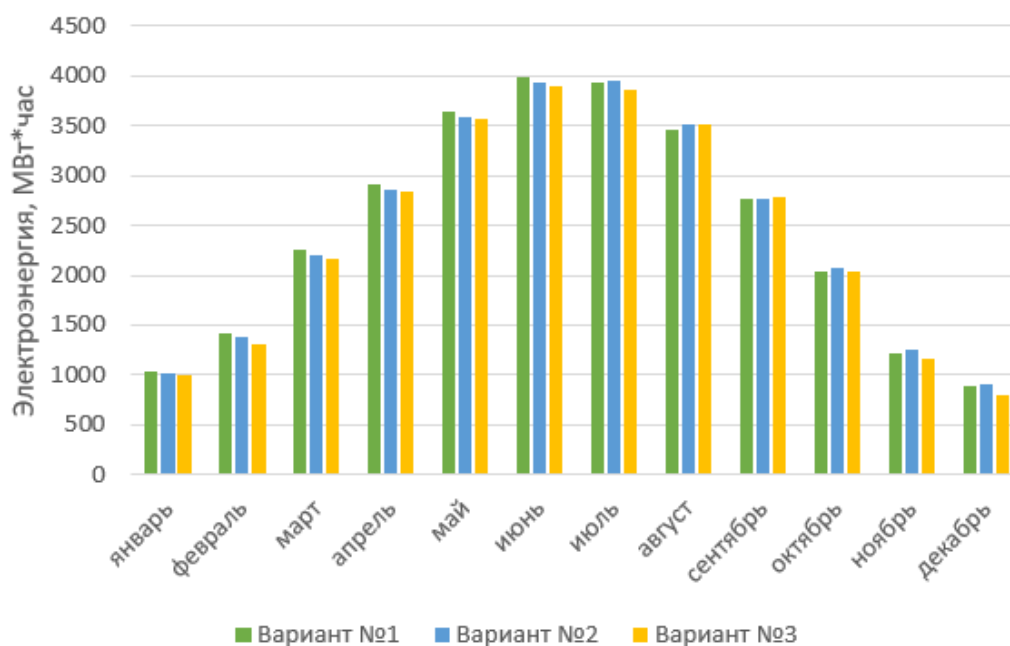


Рис. 4 – График выработки электроэнергии по месяцам для трёх вариантов месторасположения СЭС в Южном регионе страны

Как видно из построенного графика выработка электроэнергии в летние месяцы для всех вариантов кроме отличается незначительно. Хотя первый вариант характеризуется наименьшей выработкой электроэнергии в осенний период, его высокая производительность в весенний период позволяет достичь наибольшей годовой выработки.

Исходя из графика влиянию климатических показателей на выработку электроэнергии подвержены все варианты. Первый вариант характеризуется наибольшим потенциалом выработки электроэнергии.

Таким образом, оценив солнечную инсоляцию и потенциальную выработкой электроэнергии для пяти различных месторасположений СЭС в Южном регионе РК, можно сделать вывод, что наиболее эффективным является строительство станции в местности первого варианта – вблизи подстанции Абай-Базар, однако перед созданием рабочего проекта необходимо провести технико экономическое обоснование.

Заключение

Анализ современного состояния возобновляемых источников энергии показывает, что на 2025 год в Казахстане эксплуатируется 154 объекта ВИЭ суммарной мощностью 3,08 ГВт, включая солнечные электростанции общей мощностью 1,22 ГВт. Доля ВИЭ в выработке электроэнергии по итогам 2024 года составила 6,43 %, что на 13,6 % выше показателя 2023 года, что свидетельствует о поступательном развитии сектора.

Для выбора наиболее перспективных площадок под строительство СЭС были рассмотрены три варианта размещения. Расчёты показали, что наибольшая солнечная инсоляция (187 Вт/м²) и потенциальная годовая выработка

электроэнергии (34 550 тыс. МВт·ч) достигаются на участке вблизи подстанции Абай-Базар. Другие варианты — Коксарай и Шолаккорган — показали меньшие значения годовой генерации (32 320 тыс. МВт·ч в минимальном случае).

Таким образом, проведённые расчёты подтверждают, что строительство солнечной электростанции в районе подстанции Абай-Базар является наиболее оптимальным решением. Реализация проекта позволит увеличить долю возобновляемых источников энергии в энергобалансе страны, сократить дефицит мощности в Южном регионе и обеспечить выполнение международных обязательств Казахстана по снижению выбросов парниковых газов.

Список литературы

1. Mehdiyev A. J., Orazbekova A. K. Experimental Study of the Efficiency of Bifacial Solar Modules in the Climatic Conditions of Kazakhstan. Bulletin of Science of KazATU, 2023. – С. 45–52.
2. Ахметов Т. Х., Байтенова Л. М., Кожамкулова Ж. Ж. Design and Performance Analysis of a Solar Power Tower Plant in Kazakhstan. Modern Science and Management, 2024. – С. 101–110.
3. Kazakhstan Sees Significant Growth in Renewable Energy Output in First Half of 2025. Министерство энергетики РК, 2025. – С. 12–18.
4. Share of renewable energy in Kazakhstan's electricity generation reaches 6.81% in H1 2025. Renewables.az, 2025. – С. 7–14.
5. Berdimurat N., Abaev A. A., Satmurzaev A. A., Jussibaliyeva A. K., Nurmagambetova A. Z. Prospects for the use of solar energy in rural development. Vestnik Economy, 2022. – С. 88–95.
6. Крицкий Д. В., Щедров И. Ю. Perspectives of Using Solar Power Plants in Central Asia under Energy Transition Conditions. IMEMO, 2024. – С. 33–41.
7. Schakhray I. S., Terukov E. I., Abolmasov C. N. Prospects Development Solar Energy. Journal of Physics and Energy, 2024. – С. 56–63.

ӨӨЖ 45.33.31

ШУНТТЫҚ РЕАКТОРЛАРДЫҢ ШУ МЕН ДІРІЛДІ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЖЕТІЛДІРУ АРҚЫЛЫ АЗАЙТУ ТӘСІЛДЕРІ

Қойлыбаев М.Ж., Әмитов Е.Т.

Ғ.Ж.Дәукеев атындағы «Алматы энергетика және байланыс университеті»
e-mail: koilybayev.meiirzhan@mail.ru; e.amitov@au.es.kz

Аннотация. Зерттеудің өзектілігі реактор шуының көзі болып табылатын діріл, реактордың өзінің механикалық беріктігіне әсер етіп, қызмет ету мерзімін төмендететіндігімен байланысты. Осы зерттеулердің мақсаты реактор жұмыс

жасау циклін ұлғайту үшін құрылымы және қолданылатын материалдарды жетілдіру негізінде ұсынылған инновациялық шешімдерді пайдалана отырып, шунттаушы май реакторларындағы діріл мен шуды азайту болып табылады. Ұсынылған кешенді тәсілдің ғылыми жаңалығы - резервуар қабырғаларының қозғалысының амплитудасын төмендету және сәйкесінше компьютерлік модельдеуді және жобаланған реактордың резервуар дизайнын оңтайландыруды қолдана отырып, реактордың діріл деңгейін төмендету және реактордың белсенді бөлігі үшін төмен діріл-акустикалық сипаттамалары бар материалдарды қолдану. Жаңа РОМ-60000/525-Y1 реакторының шу сипаттамаларын Қазақстанда өндірілетін осы класстағы реакторларының қабылдау сынақтарының нәтижелерімен салыстыру нәтижесінде жаңа реакторлардың дыбыстық қуатының деңгейінің төмендегенін растады. Зерттеу нәтижелері отандық трансформатор құрылысы үшін үлкен практикалық маңызға ие болып табылады.

Түйінді сөздер: шунттау реакторы, белсенді бөліктің дірілі, реактор құрылымын жетілдіру, діріл-акустикалық сипаттамалары, зерттеу, реакторды қыздыру сынағы, реактивті қуат, кернеу.

Кіріспе

Шунттаушы май реакторлары электр желілерінің объектілерінде қолданылады. Ол ультра жоғары кернеулі желілердің өткізу қабілетін арттыра отырып, олардың реактивті қуатын түсіреді, сондай-ақ реактивті қуат пен кернеуді реттейді. Электр желілеріндегі реактивті қуат ағының пайда болу салдары тұтыну тұрақсыздығы мен реактивті қуат генерациясы болып табылады. Шамадан тыс реактивті қуат, активті шығындардың және желі жиілігінің жоғарылауына әсер етеді [1-5]. Жүктеме сипаты өзгерген кезде жүйеден келетін реактивті ток та өзгереді. Реактивті ток өткен кезде кернеудің төмендеуі орын алады және жүйедегі кернеу бос жүріс кернеуіне қатысты төмендейді. Сонымен қатар, реактивті токтың ағымы желіде қосымша шығындар тудырады.

Энергияны тұтынудың және/немесе өндірудің өзгеруіне байланысты айнымалы реактивті қуат талаптарын қанағаттандыру мүмкін емес жүйелер үшін жүйенің белгіленген және қолайлы шарттарда жұмыс істеуін қамтамасыз ету үшін Түзету немесе компенсациялау құралдарын пайдалану әдеттегі тәжірибе болып табылады.

Тұтынуы мен генерациясы жоғары болжамды және тұрақты желілерде конденсаторлық батареялар немесе тұрақты қуатты шунттау реакторлары қолданылады. Алайда, бұл жағдайда реактивті қуаттың орнын толтыру тек белгілі бір жұмыс жағдайлары үшін жүзеге асырылады. Егер осы агрегаттарды механикалық комутациялау қамтамасыз етілсе, үлкен икемділікке қол жеткізуге болады. Шунттық реактор кернеу деңгейін 2% шегін аспайтындай етіп қалыпқа келтіреді. Оны орнатудың нәтижесі активті шығындардың айтарлықтай төмендеуі болып табылады: электр энергиясының жоғалуының 15-20% төмендеуі, бұл өз кезегінде жүйенің тұрақтылығы мен өткізу қабілеттілігінің жақсаруына әкеледі [6, 7].

Эксплуация процесінде трансформаторлық-реакторлық жабдық шу шығарады, оның себебі жабдықтың дірілі болып табылады. Талдау көрсеткендей, күшті діріл мен шудың көздері тұрақты токтың басқару орамалары болып табылады. Ол ядроның магниттік қанығу дәрежесін өзгертетін тұрақты магниттік ығысу ағынын қамтамасыз ету үшін қолданылады [8, 9]. Сондай-ақ, реакторлардың дірілдеуінің негізгі себептеріне магниттік материалдың кристалдық торының деформациясына әкелетін кремний болатынын магнитострикциясы және белсенді аймақ дискілері арасындағы электромагниттік күш және орамалардағы динамикалық күштер жатады [10-13].

Бүгінгі таңда 110-750 кВ реактор қуаты бар трансформаторлар шығаратын шудың орташа деңгейі 79 дБ(А) ден 90 дБ(А) сәл жоғары [14,15]. Діріл реактордың механикалық беріктігіне әсер етіп, оның қызмет ету мерзімін қысқартады және ішкі зақымдану қаупін арттырады. Белсенді бөліктің тұрақты діріліне байланысты, ең алдымен, оқшаулағыш компоненттердің тозуы орын алады, бұл жиі күрделі жөндеуге және осы компоненттерді ауыстыруға әкеледі. Сондықтан шу мен дірілді азайту қазіргі заманғы трансформаторлық техниканың өзекті мәселесі болып қала береді.

Ұсынылған кешенді тәсіл резервуар қабырғаларының қозғалыс амплитудасын төмендету мүмкіндігін және сәйкесінше компьютерлік модельдеуді және жобаланған реактордың резервуарының дизайнын оңтайландыруды және реактордың белсенді бөлігі үшін төмен діріл-акустикалық сипаттамалары бар материалдарды қолдана отырып, реактордың діріл деңгейін төмендетуге негізделген. Бұл жұмыс 110-750 кВ кернеу класындағы реакторлар шу мен дірілді төмендетуді зерттеуге, соның ішінде ром-60000/525-У1 шунттық майлы реакторының, жетілдірілген құрылымының мысалында, аналогтармен салыстырғанда жақсартылған діріл-акустикалық сипаттамалары арқылы олардың қызмет ету мерзімін ұзартуға бағытталған.

Әдістеме

Зерттеу үшін діріл және шу сипаттамалары жақсартылған ROM-60000/525-U1 реакторы пайдаланылды. Оның негізгі техникалық деректері 1-кестеде көрсетілген.

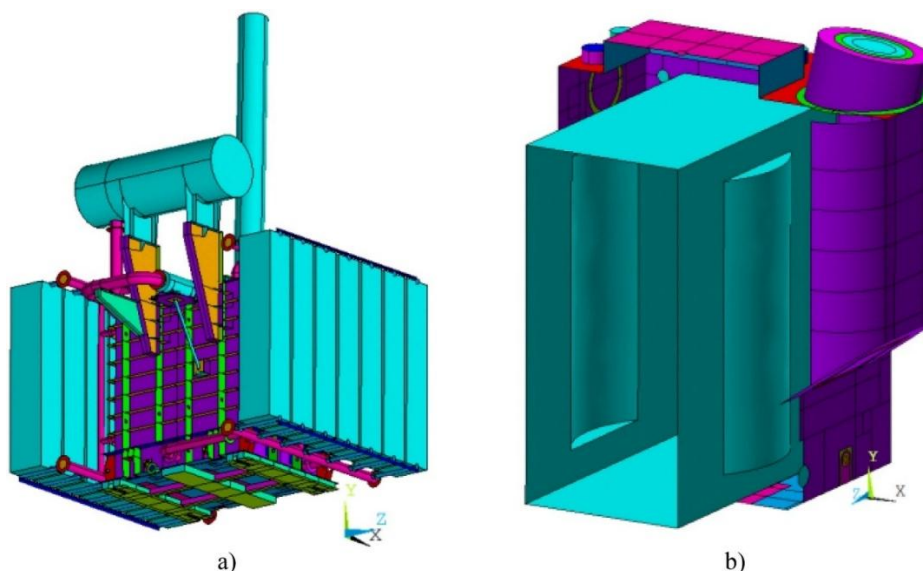
Кесте 1. ROM-60000/525-U1 реакторының негізгі техникалық деректері

Атауы	Техникалық сипаттамалары
Номиналды қуат, кВА	60000
Номиналды кернеу, кВ	$525/\sqrt{3}$
Сызықтық кернеу, кВ	525
Номиналды ең үлкен кернеу, кВ	$550\sqrt{3}$
Номиналды ток, А	197,94
Номиналды толық кедергі, Ом	1531,6
Есептік температураға келтірілген шығындар 75° С кВт	140

Схема және байланыс тобы	Ү-тікелей жерлендіру немесе реактор арқылы
Жиілігі, Гц	50
Фазалар саны	1
Салқындату түрі	ONAN
Бейтарап орамалар	Жерге тұйықталған
Орам материалы	Мыс (Cu)
Май маркасы (түрі)	Nytro Lyra X

Дірілді есептеу гармоникалық жүктеме әсеріне әртүрлі жиіліктердегі резервуар қабырғаларының иілу амплитудасын есептеуді қамтиды. Геометриялық модельді құру кезінде қамыт, орамасы, дискілері, шпилькалары бар белсенді бөліктің дизайны, сондай-ақ резервуардың түбіне тіреу орындарының орналасуы ескеріледі. Сонымен қатар, реактордың резервуарын ақырлы элементтер әдісімен жобалау кезінде қабырғалардың қозғалу амплитудасын төмендетудің және құрылымның механикалық қаттылығын арттырудың тиімді әдісі көлденең және тік жиектерді ұлғайту және жиілік сипаттамаларын қалыптастыру үшін жергілікті массаларды қолдану болып табылады [16-18].

Осы реакторды жобалау кезеңінде Soft Team Group компаниясының TDS 3D дизайны, компьютерлік модельдеу және визуализация бағдарламасы пайдаланылды [19]. TDS бағдарламасында алынған реактордың геометриялық моделі қатайтатын қабырғалары бар кеңістіктік қабық болып табылады (1a-сурет).



Сурет 1 – 3D – модельдер: реактордың геометриялық моделі (a) және резервуардың геометриялық моделі (b): 1-кеңейту цистернасы (a); 2 – радиатор (a); 3 – жоғары вольтты кіріс (a); 4 – реактордың резервуары (b)

Резервуардың геометриялық моделінің жалпы көрінісі 1б-суретте көрсетілген.

Реактордың белсенді секциясының магниттік тізбегін жасау үшін төмен діріл-акустикалық сипаттамалары бар материал ретінде электртехникалық болат маркасы М090-27Рb НІВ Laser лазерлік өңдеумен өңделген, ал резеңке тығыздағыштар үшін нитрил бутадиенді резеңке пайдаланылды.

Реактор қабырғаларының ығысу амплитудасын азайту және сәйкесінше реактордың діріл деңгейін төмендету үшін TDS ортасында соңғы элементтер әдісі негізінде резервуардың дизайнын компьютерлік модельдеу және оңтайландыру қолданылды. Есептеу үлгісінде соңғы элементтердің келесі түрлері қолданылды: SHELL181, SOLID185, PIPE59; байланыс элементтері: TARGE170 және CONTA174.

Нәтижесінде POM-60000/525-Y1 цистернасының құрылымы жетілдірілді: 1) М-типті реактордың салқындату жүйесіндегі радиаторлар саны екі жағынан 6-дан 7-ге дейін ұлғайтылды; 2) реактор цистернасының қабырғасындағы тік және көлденең қатайтқыштардың саны ұлғайтылды.

Зерттеу нәтижесіне магниттік контурды М090-27Рb НІВ лазерлі электрлік болаттан резеңке тығыздағыштарды (2-сурет) және диаметрі 800 және 120 мм магниттік, сондай-ақ орталық өзекшедегі адаптер дискілерін пайдалана отырып жасағанда белсенді бөліктен реактор цистернасына берілетін шу мен дірілдің 2-3 дБ төмендеуін көрсетті. реактор ядросының құрылымы.

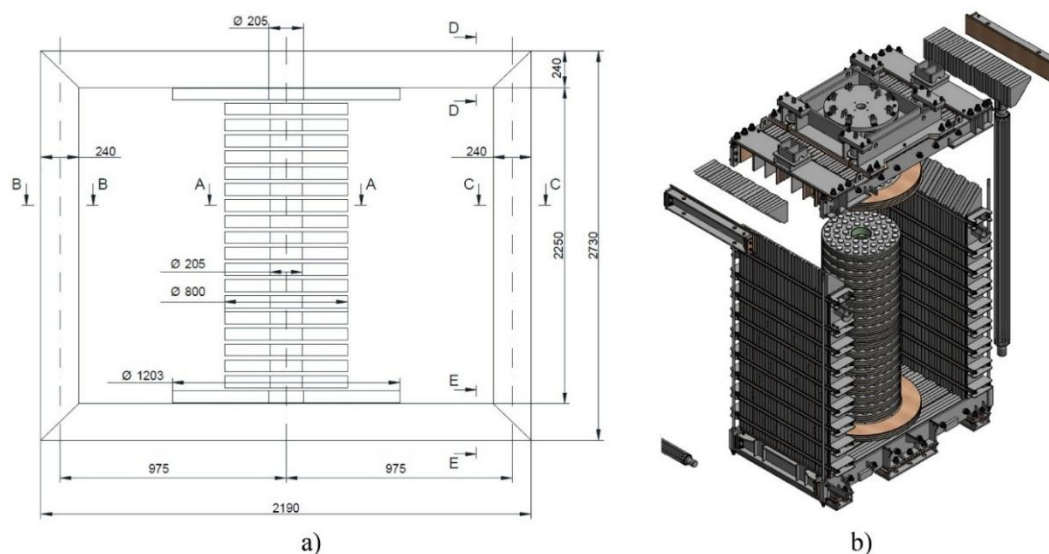


Сурет 2 – реактордың (а) 3D моделіне резеңке төсемдерді орнату: 1-магниттік жүйенің пакеттері арасында (магниттік жүйенің пакеттері арасында 0,5 мм резеңке төсемдер); 2- балка мен ядро арасында (балка мен ядро арасында 4 мм резеңке төсемдері); жиналған реакторда (b)

Магниттік жүйенің өзегін престоу күші — қамыт шпилькаларын тарту күші 26 кН, ал бандаждардың тарту күші 12 кН құрайды.

Сонымен қатар, бутадиен-нитрил каучукті резеңке 110 °С температурада майға төзімділігімен ерекшеленеді. Резеңке төсемелердің қалыңдығы, өлшемдері және орналасу орны реактор өзегінің құрылымдық ерекшеліктеріне, сондай-ақ магниттік жүйені престоу күшіне байланысты таңдалады.

3-суретте TDS бағдарламасында алынған өлшемдік параметрлер мен жетілдірілген POM-60000/525-Y1 реакторының 3D үлгісі көрсетілген.



Сурет 3 – Магнитөткізгіштің өлшемдік параметрлері (а) және реактордың 3D үлгісі (b): 1 – реактордың орталық өзегі (а); 2 – жоғарғы қамыт (а); 3 – төменгі қамыт (а); 4 – бүйірлік өзек (а); 5 – жоғарғы диск (а); 6 – төменгі диск (а); 7 – бекіткіш кронштейн (b); 8 – электротехникалық болат (b); 9 – Балка (b).

Модельдеу нәтижелері көрсеткендей, бутадиен-нитрил каучуктан (NBR) жасалған резеңке демпферлерді белсенді қимада төсем ретінде орнату арқылы шудың және дірілдің деңгейін төмендету әсері бар екені анықталды. Бұл әсер белсенді ауданды кішігірім аудандарға бөлу арқылы қамтамасыз етілді.

Бұл зерттеулер мыналарды қамтиды:

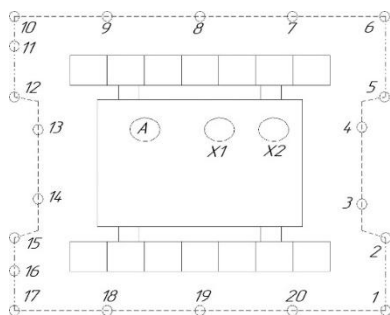
- 1) жетілдірілген POM-60000/525-Y1 реакторының шу сипаттамаларын Қазақстанда шығарылған осы класстағы ұқсас реакторлардың міндетті қабылдау сынақтарының нәтижелерімен салыстыру;
- 2) толық сынақ циклін жүзеге асыру арқылы реактордың шуы мен діріл деңгейін төмендету бойынша қарастырылатын инновациялық шешімдерді пайдалану кезінде жетілдірілген реактор сипаттамаларының қолданыстағы отандық және халықаралық стандарттар талаптарына сәйкестігін тексеру: діріл-акустикалық сынақтар; импульстік сынақтар; қыздыру сынақтары.

2. Нәтижелер және талқылау

2.1 Шу мен діріл сынықтары

2.1.1 Шу сынақтарын жүргізу

Жоғарыда айтылғандай, сынақтағы жаңа POM-60000/525-Y1 типті реакторда 2 топқа бөлінген 7 радиатордан тұратын «М (ONAN)» түріндегі салқындату жүйесі бар. 4-суретте салқындату жүйесі бар реактордың дыбыс деңгейін өлшеу нүктелерінің орналасуы көрсетілген.



Сурет 4 – реактордың дыбыс деңгейін өлшеу нүктелерінің орналасуы: А-жоғары вольтты Шығыс; X1, X2 - Жерге тұйықталған жағы

Сыналатын реактор тұғырға, роликсіз орнатылды; номиналды қоздыру кернеуі 303,11 кВ; реактор багының биіктігі 3190 мм; сынақ бөлмесінің жалпы ауданы 891 м²; өлшеу қашықтығы үшін өлшеу сызығының периметрінің ұзындығы L=2,0 м 34 см. дыбыс деңгейін өлшеу B&K 2250I-100 моделінің қол анализаторының көмегімен жүзеге асырылды (сурет. 5).



Сурет - 5 -РОМ-60000/525-У1 реакторының дыбыс деңгейін өлшеу процесі

Өлшеу сызықтары реактордың сәулелену бетінен 0,3 м қашықтықта реактор биіктігінің 1/3 және 2/3 бөлігіне тең биіктікте орналастырылды. Сынақ объектісіне қарайтын әрбір өлшеу нүктесінде микрофон орнатылды.

Сынақтар алдында дыбыс деңгейін өлшегіш акустикалық калибрленді және қоршаған шу деңгейлері өлшенді. 2 және 3 кестелерде алынған дыбысты өлшеу деректері берілген.

Кесте 2. Бөгде шу деңгейін өлшеу нәтижелері

	Бөгде шу деңгейінің өлшенген мәндері (фондық деңгей)										
Өлшеу нүктелері	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	Фондық шудың орташа мәні (dB)
Сынақ алдында	39,3	38,6	38,9	39,3	39,4	38,8	38,4	38,5	38,5	38,6	38,8
Сынақтан кейін	38,6	38,4	39,0	39,5	39,3	38,9	38,1	38,6	38,6	38,6	

Кесте 3. Дыбыс деңгейін өлшеу нәтижелері

Дыбыстық қуаттың өлшенген мәндері (қашықтық 2м), (dB)		
Өлшеу нүктелері	1/2 Н бак биіктігінде	Резервуардың 2/3 Н биіктігінде
1	68,5	68,5
2	72,3	72,5
3	70,2	70,6
4	66,5	66,6
5	68,5	68,8
6	68,7	68,7
7	65,3	65,5
8	67,4	66,6
9	68,8	68,8
10	61,7	61,9
11	68,5	68,7
12	68,2	68,4
Өлшеу нәтижелерінің орташа мәні	67,88	67,97
Өлшеу нәтижелерінің орташа мәні, $L_{a0,3} = 67,93$ (dB)		

Өлшеу нәтижелері өңделді және түзетілген дыбыс қуаты деңгейі МемСТ 51401–99 сәйкес есептелді.

Сынақтар жүргізілген бөлме үшін дыбыстың шағылысу коэффициентінің тұрақтысы К (дБА) есептеледі:

$$K = 10 \cdot \lg \cdot \left(1 + 4 \cdot \frac{S}{A} \right), \quad (1)$$

мұндағы: S – өлшеу бетінің ауданы;

A - бөлмедегі дыбысты жұтудың баламалы ауданы, ол шамамен формула бойынша есептеледі:

$$A = a \cdot S_v = 0,15 \cdot 891 = 133,65 \text{ м}^2, \quad (2)$$

мұндағы: a - 0,15-ке тең дыбыс жұту коэффициенті (МемСТ 51401-99), S_v – сынақ камерасының жалпы ауданы, м^2

Реактордың сәулеленуінің өлшеу бетінің ауданы:

$$S_{0,3} = 1,25 \cdot H \cdot L = 1,25 \cdot 3,19 \cdot 34 = 135,57 \text{ м}^2, \quad (3)$$

мұндағы: H – резервуардың биіктігі; L - өлшеу сызығының периметрінің ұзындығы.

Шағылысқан дыбыс әсерін ескере отырып, К тұрақтысының есептелген мәні:

$$K_{0,3} = 10 \cdot \lg \cdot \left(1 + 4 \cdot \frac{133,65}{135,57} \right) = 7,04 \text{ дБА},$$

Салқындату жүйесі бар реактордың орташа дыбыс деңгейін L_A есептеу нәтижелері:

$$L_{A0,3} = L_{a0,3} - \Delta L_{a0,3} - K_{0,3} = 68 - 0 - 7,04 = 60,96 \text{ дБА}, \quad (4)$$

Дыбыс қуатының реттелген деңгейі:

$$L_{pA} = L_A + 10 \cdot \lg \cdot (S_{0,3}) = 60,96 + 10 \cdot \lg \cdot (135,57) = 82,2 \text{ дБА}, \quad (5)$$

Осылайша, РОМ-60000/525 кВ типті реактордың түзетілген дыбыс қуаты деңгейі 82,2 дБА құрады, бұл ІЕС 60076-6-2014 стандартымен белгіленген 100 дБА рұқсат етілген мәннен айтарлықтай төмен. Бұдан бөлек, жоғарыда атап өтілгендей, қазіргі таңда 110–750 кВ қуаттылығындағы реактор-трансформаторлардың орташа шу деңгейі 79 дБ(А)-ден сәл жоғары 90 дБ(А)-ге дейін өзгереді. Сондықтан алынған 82,2 дБА түзетілген дыбыс қуатының деңгейі төменгі шекке жақын орналасқан, яғни бұл реактордың шу деңгейі аз екенін көрсетеді. Салыстыру үшін, Қазақстанда өндірілетін жаңа РОМБСМ-60000/500-У1 реакторының қабылдау-тапсыру сынақтары нәтижесінде анықталған түзетілген дыбыс қуатының деңгейі $L_{pA} = 88,0$ дБА құрайды [20].

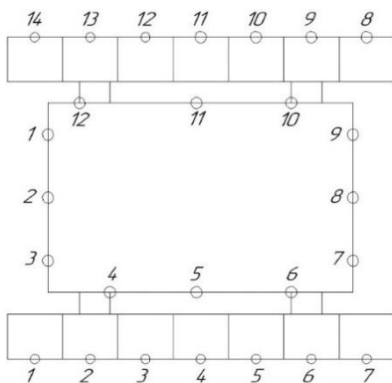
2.1.2 діріл сынақтарын жүргізу

Бак қабырғасы мен салқындату жүйесінің діріл-орын ауыстырулары толық жиналған РОМ-60000/525-У1 шунттау реакторында (6-сурет) өлшенді. Реактор тіреуіш тұғырда, роликтерсіз орнатылған; қоздыру кернеуі 303,11 кВ; сынақ әдістемесі МемСТ 12.1.012–90 стандартына сәйкес жүргізілді. Өлшеу құрылғысы — SVAN-958.



Сурет 6 – РОМ-60000/525-У1 реакторының резервуар қабырғасының және салқындату жүйесінің діріл қозғалысын өлшеу процесі

Діріл қозғалысын өлшеу нүктелерінің орналасуы 7-суретте көрсетілген.



Сурет 7 – резервуар қабырғасының діріл қозғалысын өлшеу нүктелерінің орналасуы (1-12)және реактордың салқындату жүйесінде (1-14)

Көрсетілген нүктелердегі діріл қозғалыстарын өлшеу нәтижелері 4 және 5 кестелерде келтірілген.

Кесте 4. Резервуар қабырғасының өлшенген діріл қозғалысы, мкм

Нүкте №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
мкм	3,42	11,4	16,2	5,34	7,29	10,7	11,5	21,9	5,74	7,42	9,13	11,42

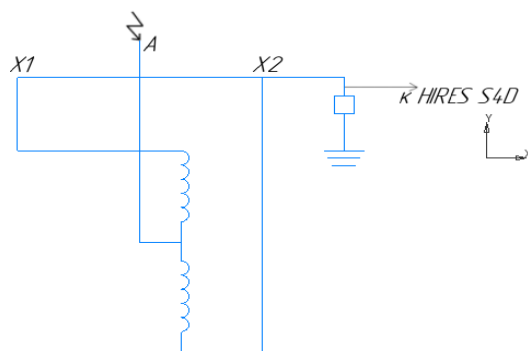
Кесте 5. Салқындату жүйесіндегі өлшенген діріл қозғалысы, мкм

Нүкте №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
мкм	5,1 4	7,1 9	12,1 5	12,0 3	10,3 3	,3 8	6,1 5	4,8 5	8,1 9	8,6 4	8,6 2	11,3 5	7,1 0	5,3 5

Максималды діріл себебінен орын ауыстыру шамасы салқындату жүйесі бар РОМ-60000/525-У1 типті реакторда келесідей болды: бак қабырғасында – 21,9 мкм, бұл ІЕС 60076-6-2014 стандарты бойынша рұқсат етілген мән – 30 мкм; салқындату жүйесінде – 12,15 мкм, рұқсат етілген мән – 60 мкм. РОМ-60000/525-У1 типті шунттау реакторы діріл-акустикалық сынақтардан сәтті өтті және ГОСТ 12.1.012–90 талаптарына сай келеді.

2.2 Реактордың импульстік сынақтарының нәтижелері

Найзағай импульстарының толық (ПГИ), сызылған (СГИ) және коммутациялық (КИ) кернеулерінің әсерінен оқшаулаудың электрлік беріктігін тексеру ГОСТ 1516.2–97, ГОСТ 1516.3–96 және ІЕС 60076–3:2013 стандарттарына сәйкес, теріс полярлықтағы импульстарды сызықтық шығару жағынан үш соққылы әдіспен беру арқылы жүргізілді. Сынақ сызбасы 8-суретте көрсетілген.

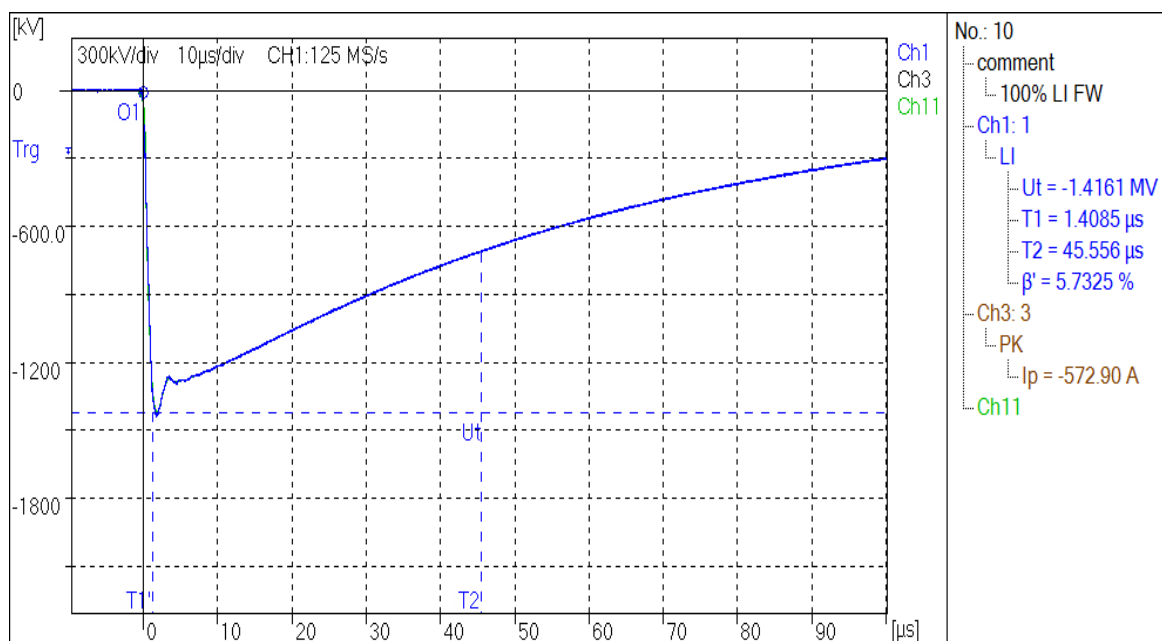


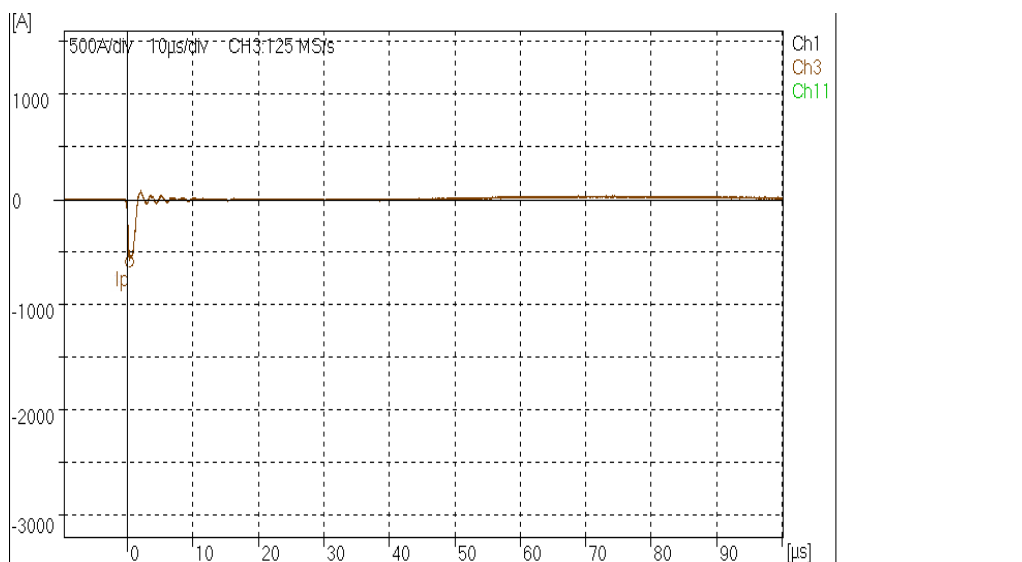
Сурет 8 – ПГИ, СГИ және КИ кернеулеріне әсер ету реакторының оқшаулауын сынау схемасы

Оқшаулаудың жарамсыз зақымдарын анықтау үшін негізгі әдіс ретінде сынақ орамасына импульстік кернеу берілген кезде кернеу мен ток тербеліс формаларының өзгерісіне негізделген әдіс қолданылды.

Толық найзағай импульсы – 1425 кВ; фронт ұзақтығы $T_f = 1,2 \pm 0,36$ мкс, импульс ұзақтығы $T_i = 50 \pm 10$ мкс. Сызылған найзағай импульсы – 1550 кВ; алдын ала разряд уақыты $T_s = 2,5 - 5$ мкс. Коммутациялық найзағай импульсы – 1050 кВ; импульстің көтерілу уақыты – 20 мкс-тен кем емес, импульс ұзақтығы – 500 мкс-тен кем емес. Сынақ жабдықтары: импульстік кернеу генераторы IG 240/2400G; импульстік кернеудің сыйымдылық бөлгіші SMC 1000/2200; өтпелі процестерді тіркеу құрылғысы HiRES-S4D.

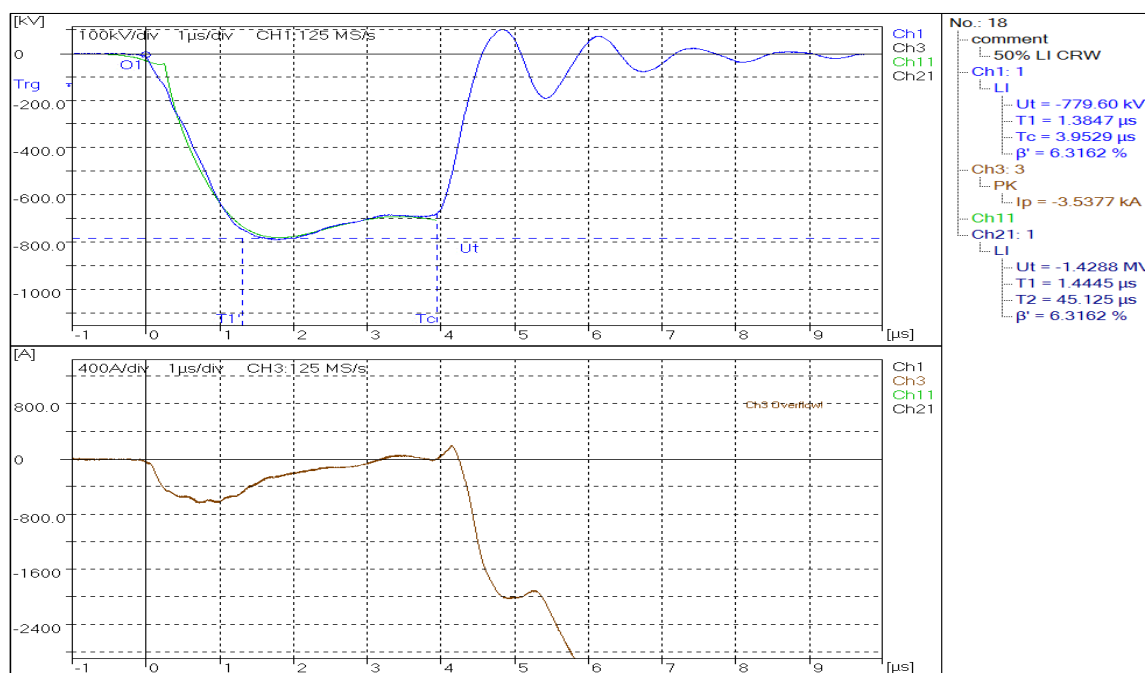
Реактордың оқшаулауы амплитудасы 1425 кВ теріс полярлықтағы ПГИ кернеулерінің әсеріне төтеп берді (9-сурет).





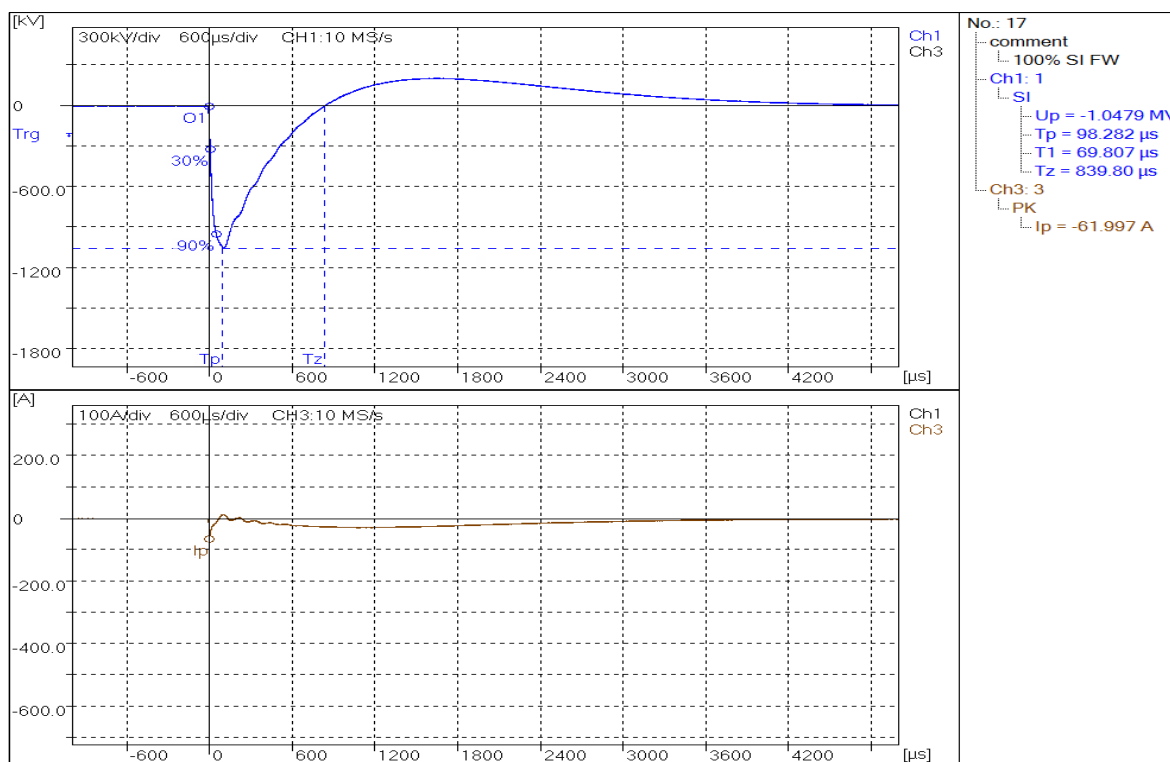
Сурет 9 – 1425 кВ толық найзағай импульсімен реактор орамасының оқшаулауын сынау осциллограммасы

Реактордың оқшаулағышы 1550 кВ теріс полярлық кернеуді қолдануға төтеп берді (10-сурет).



Сурет 10 – Реактор орамасының оқшауламасын 1550 кВ сызылған найзағай импульсімен сынау осциллограммалары

Реактордың оқшаулауы амплитудасы 1050 кВ теріс полярлықтағы КИ кернеуімен жүргізілген сынақтан сәтті өтті (11-сурет).

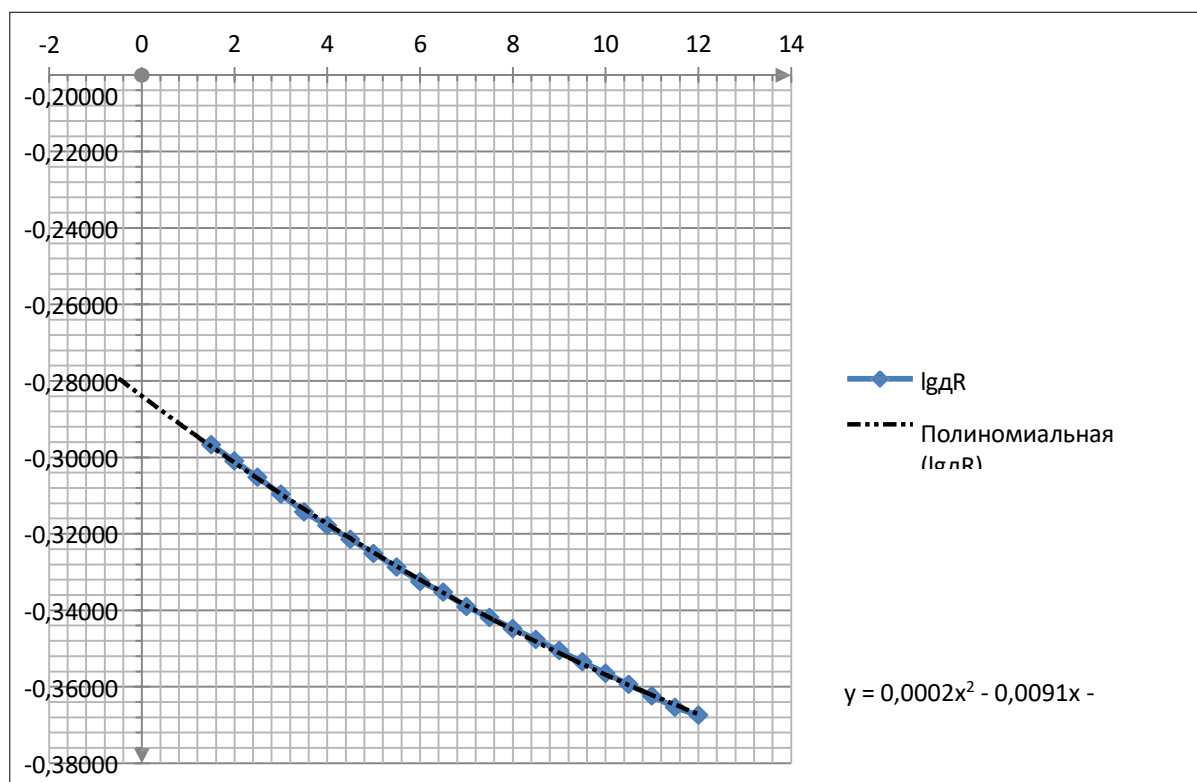


Сурет 11 – 1050 кВ коммутациялық импульсі бар реактор орамасының оқшаулауын сынау осциллограммасы

Сынақтар кезінде реактор оқшауламасында рұқсат етілмейтін зақымдар анықталған жоқ. 100% $U_{\text{сын}}$ сынақ кернеулерінде алынған осциллограммалардың пішіндерінің төмендетілген (50% $U_{\text{сын}}$) кернеу осциллограммаларымен салыстырғанда айтарлықтай бұрмалануы байқалмады. Реактор импульстік кернеулер әсерінен оқшауламаның электрлік беріктігін (сынақтан сәтті өткізді. РОМ-60000/525-У1 типті реактордың оқшауламасының электрлік беріктігі импульстік кернеулер әсерінде IEC 60076.3–2013–10 стандарты талаптарына толық сәйкес келеді.

2.3 Реакторды қыздыру сынақтарының нәтижелері

Қызуға сынақ толық жиналған және «М» салқындату жүйесімен жабдықталған шунттау реакторында жүргізілді. Сынақ МемСТ 3484.2–88 әдістемесіне сәйкес, номиналды 303,11 кВ кернеу мен 197,9 А тоқта тұрақталған температураға дейін жүргізілді. Мұнай температурасы патрубоктарда термопарлар арқылы өлшенді. Орам температурасы тұрақты тоқтағы орам кедергісінің өзгерісі бойынша анықталды. Сынақтар кезінде желдің, күн сәулесінің немесе басқа жылу сәулеленуінің әсері толық болмады. Өлшеу нәтижелері 12-суретте және 6, 7-кестелерде келтірілген.



Сурет 12 – кедергі айырмашылықтарының логарифмдері А (жоғары вольтты шығыс) және (X1+X2) - жерге тұйықталған жағы

Кесте 6. Белгіленген температураға дейін қыздыру кезіндегі температураны өлшеу нәтижелері

Уақыт, сағат	Қоршаған орта температурасы, °C				θ в/с, °C майдың жоғарғы қабаттары	Δθ в/с, °C Майдың темп. θ _{ср} асыуы	Салқындатқыштың кірісіндегі май темп. Δθ в/с, °C	Салқындатқыштың шығысындағы майдың темп. Δθ в/с, °C
	θ ₁	θ ₂	θ ₃	θ _{орт}				
1:00	33,1	32,7	32,8	32,9	70,0	37,1	70,0	38,5
2:00	34,2	33,2	33,8	33,7	72,0	38,3	72,0	41,7
3:00	35,2	34,7	34,9	34,9	76,5	41,8	76,5	43,9
4:00	35,3	34,6	34,8	34,9	79,0	44,0	79,0	44,3
5:00	35,4	34,6	35,0	35,0	81,0	46,3	81,0	46,8
6:00	35,0	34,2	34,7	34,6	83,1	48,5	83,1	48,6
7:00	34,9	34,1	34,6	34,5	85,0	50,5	85,0	51,4
8:00	34,5	34,0	34,2	34,2	85,9	51,7	85,9	51,5
9:00	34,4	34,0	34,3	34,2	86,4	52,2	86,4	52,0
10:00	34,4	34,0	34,3	34,2	86,7	52,5	86,7	52,3

Кесте 7. Трансформатор орамасының кедергісін ыстық күйде өлшеу

Уақыт, мин	Орамның кедергісі А (X1+X2)			
	R (Ом)	ΔR (Ом)	T (мин)	lgΔR
1'30"	2,9100	0,505	1,5	-0,29671
2'	2,9051	0,500	2	-0,30094
2'30"	2,9002	0,495	2,5	-0,30522
3'	2,8952	0,490	3	-0,30963
3'30"	2,8900	0,485	3,5	-0,31426
4'	2,8860	0,481	4	-0,31785
4'30"	2,8820	0,477	4,5	-0,32148
5'	2,8780	0,473	5	-0,32514
5'30"	2,8741	0,469	5,5	-0,32873
6'	2,8701	0,465	6	-0,33245
6'30"	2,8671	0,462	6,5	-0,33526
7'	2,8631	0,458	7	-0,33904
7'30"	2,8601	0,455	7,5	-0,34189
8'	2,8571	0,452	8	-0,34477
8'30"	2,8541	0,449	8,5	-0,34766
9'	2,8511	0,446	9	-0,35057
9'30"	2,8481	0,443	9,5	-0,35350
10'	2,8451	0,440	10	-0,35645
10'30"	2,8421	0,437	10,5	-0,35942
11'	2,8391	0,434	11	-0,36241
11'30"	2,8361	0,431	11,5	-0,36542
12'	2,8341	0,429	12	-0,36744
22'	соңғы есептік R _n - 2,4050 Ом			

Жүктемені өшіру кезінде R_0 кедергісіне сәйкес біз орамалардың температурасын $\theta_{\text{орм}}$ төмендегі формула бойынша анықтаймыз:

$$\theta_{\text{орм}} = \frac{R_0}{R_X} \cdot (T + \theta_X) - T, \quad (6)$$

мұндағы: T – мыс орамалары үшін 235 °C-қа тең коэффициент.

Тиісінше, орамалардың температурасының көтерілуі тең

$$\theta'_{\text{орм}} = \theta_{\text{орм}} - \theta_{\text{суту}}; \quad (7)$$

Қыздыру сынақтарының нәтижелері 8-кестеде

Кесте 8. Қыздыру сынақтарының нәтижелері

Трансформатордың құрылымдық элементтердің атауы	Температураның көтерілуі, °C	
	Сынақ нәтижелері	Нормаланған мәндер
Майдың жоғарғы қабаттары	52,5	< 60
Орамдар	58,6	< 65
Орамның ең ыстық нүктелері (ННТ)	65,7	< 75
Магниттік жүйе	55,6	< 75
Резервуардың беті	20,13	< 70

Реактордың құрылымдық элементтерінің температурасының қоршаған ауа температурасынан асып кетуі рұқсат етілген мәндерден аспайды. РОМ-60000/525-У1 реакторы қыздыру сынағы IEC 60076-6-2014 талаптарына төтеп берді және қанағаттандырады.

Қорытынды

РОМ60000/525-У1 реакторындағы резервуар қабырғасындағы тік және көлденең қаттылық жиектерінің ұлғаюы резервуар қабырғалары үшін орын ауыстыру амплитудасының төмендеуіне және сәйкесінше реактордың діріл деңгейінің төмендеуіне әкелді. Сондай-ақ, белсенді қимада бутадиен-нитрилді каучуктан (NBR) тығыздағыштар ретінде резеңке демпферлерді орнатудан шу мен діріл деңгейін төмендету әсері белсенді ауданның ұсақ бөліктерге бөлінуі есебінен қамтамасыз етілді.

Жетілдірілген РОМ-60000/525-У1 реакторының өлшенген және есептелген шу сипаттамаларын Қазақстанда өндірілетін осы класстағы ұқсас реакторлардың міндетті қабылдау сынақтарының нәтижелерімен салыстыру жаңа реактордың дыбыстық қуатының түзетілген деңгейінің төмендеуін растайды.

Ұсынылған инновациялық шешімдерді пайдалана отырып, жиналған реактордың толық, кесілген және коммутациялық импульсінің найзағай импульстарының кернеулеріне ұшыраған кезде оқшаулаудың электр беріктігін қызуға сынау және оқшауламаның электрлік беріктігін тексеру реактордың жинақталған нұсқасында ұсынылған инновациялық шешімдерді пайдалана отырып жүргізілді және жетілдірілген реактордың шекті сипаттамаларының қолданыстағы отандық және халықаралық стандарттар талаптарына сәйкес келетінін көрсетті.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Новикова М.А., Садовская А.С., Соколов С.Е., Соколова И.С., Сулейменова Д.Т. Компенсация реактивной мощности и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях городского типа. Вестник АУЭС. – Алматы: НАО «АУЭС». – №1 (48). –2020. –С. 37–42.
2. Meiyang Zhu.: Mechanism and Problem Analysis of High-Voltage Shunt Reactor. AIP Conference Proceedings 2066, pp.1–5, 2019. doi.org/10.1063/1.5089097.
3. Tian M., et al.: A controllable reactor of transformer type. IEEE Trans. Power Del. 19(4), pp. 1718–1726, 2004.

4. Yinbiao Shu, et al.: Research and application of UHV power transmission in China. *High Voltage* 3(1), 2018. pp. 1-13.
5. Sun k., et al.: Development of UHV Power Transmission in China. [Ultra-high Voltage AC/DC Power Transmission](#). pp 23–37, 2017.
6. Belyaev A. N., et al.: Steady-state and transient stability of 500kV long-distance AC transmission lines with magnetically controlled shunt reactors. *IEEE Power Tech Conference*, (2005). DOI:[10.1109/PTC.2005.4524464](#).
7. Seyedreza Aali. Shunt active DC filter based on intelligence controller for HVDC link. *High Voltage* 2(4), pp. 274-279, 2017.
8. Ben Tong, et al.: Magnetically Controlled Saturable Reactor Core Vibration Under Practical Working Conditions. *IEEE Trans. Magn.* 53(6), pp. 4-7, 2017. DOI:[10.1109/TMAG.2017.2664104](#).
9. Yuan Yuan, et al.: A review: Research on corrosive sulphur in electrical power equipment. *High Voltage* (7), pp. 209–221, 2022.
10. Y. Gao, et al.: Vibration analysis of a reactor driven by an inverter power supply considering electromagnetism and magnetostriction. *IEEE Trans. Magn.* 45(10), pp. 4789–4792, 2009.
11. Zhang P., et al.: Study on Vibration of Iron Core of Transformer and Reactor Based on Maxwell Stress and Anisotropic Magnetostriction. *IEEE Transactions on Magnetics*, 55(2), pp.1-5, 2019. DOI: [10.1109/TMAG.2018.2875017](#).
12. Chen D., et al.: Study of Magnetostrictive Influence of Electrical Sheet Steel Under Different DC Biases. *IEEE Transactions on Magnetics*, 55(2), 2019. DOI: [10.1109/TMAG.2018.2873785](#).
13. Shuai P., et al.: Impact of Core Shape and Material on the Acoustic Noise Emission of Medium Frequency, medium Voltage Transformers. 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), pp. 1-11. 2015.
14. Murat A., et al.: Research and modeling of magnetically controlled shunt reactors in PSCAD/EMTDC. *Proc. 7th Int. Conf. Electr. Electron. Eng. (ICEEE)*, Antalya, Turkey, pp. 155–159, 2020.
15. Beltle M., Tenbohlen S. Power Transformer Diagnosis based on Mechanical Oscillations due to AC and DC Currents. *IEEE Trans.on Diel.and Electr.Ins.* 23(3), pp. 1515-1522, 2016.
16. Isaac C.W., at al.: Numerical investigation of the vibro-acoustic response of functionally graded lightweight square panel at low and mid-frequency regions. [Composite Structures](#): 259:1-17 (113460) (2021)
17. Wrona, S., at al.: Sound transmission through a panel with a hybrid active and semi-active control system. [Journal of Sound and Vibration](#): 2022. 536, 117172
18. Mazur K., at al.: Vibroacoustical Performance Analysis of a Rigid Device Casing with Piezoelectric Shunt Damping. *Sensors*: 2021, 21(7), 2517
19. [softteamgroup.com.ua/Home/ProductInfo?id=7d13b7f9-5c4c-44cb-ad44-52694bca164e](#).
20. Hyperlink to supporting test documents:
<https://drive.google.com/drive/folders/1pONbTSHgscVpXBTdI5BFjm8VyrWV6Vwr?usp=sharing>

СЕКЦИЯ 2 «ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ (ВИЭ)»

UDC: 620.92;539.232;535.215.6

EFFECT OF TEMPERATURE ON PHOTOVOLTAIC CHARACTERISTICS OF PV MODULES BASED ON CIGS SOLAR CELLS

Akbarov F.A.^{1*}, Kabulov R.R.², Alimov A.A.¹, Muminov Kh.A.¹

¹Tashkent state technical university after named Islam Karimov, Tashkent,
Uzbekistan

²Physical-Technical Institute after named S.A. Azimov, Tashkent, Uzbekistan

*e-mail: farrux1927@mail.ru

Abstract: The article presents the experimental results of the temperature dependence of the load current-voltage characteristics of a solar photovoltaic (PV) module based on a polycrystalline semiconductor binary compound Cu (In,Ga)Se₂ under normal sunlight $P_{\text{rad}}=800\pm5$ W/m², in a temperature range of (32÷60) °C. The PV module efficiency decreases linearly with increasing temperature, from 12.5% to 11.45%, and a linear dependence with two slopes is observed. The CIGS PV module, in the temperature range of 300 – 310 °K, had a temperature coefficient of efficiency $K_{\text{Eff1}} \approx -0.0342$ % / °K, and in the range of 310 - 320 °K had a temperature coefficient of efficiency $K_{\text{Eff2}} \approx -0.0917$ % / °K. The conducted experimental studies have shown that the PV module based on CIGS solar cells, under conditions close to the average real illumination conditions $P_{\text{rad}} \approx 800$ W/m² in the temperature range of 300–320 °C, has a negative temperature coefficient of change in efficiency $K_{\text{Eff1}} \approx -0.0342\%/^{\circ}\text{K}$ and $K_{\text{Eff2}} \approx -0.0917\%/^{\circ}\text{K}$.

Key words: solar photovoltaic module, polycrystalline semiconductor, Cu(In,Ga)Se₂, solar radiation, efficiency, short-circuit current, open circuit voltage.

I. Introduction

Currently, in order to meet the growing needs of developing industries and consumer needs, the world needs to increase electricity generation, especially in an environmentally friendly way. In this regard, in recent years much attention has been paid to the use of solar energy by directly converting it into electrical energy using photovoltaic devices [1,2]. One of the promising areas in this area is the creation of photovoltaic stations, since the electrical energy they receive is environmentally friendly, and solar energy is inexhaustible. In this regard, the development of thin-film solar cells is of great interest. Such thin-film solar cells, due to the high value of the layer absorption coefficient, make it possible to significantly reduce the material consumption for the production of solar cells, since a layer with a thickness of only ~ 2.0–2.5 μm is sufficient to absorb most of the solar radiation spectrum. One of such

third-generation thin-film solar cells is a solar cell created on the basis of a copper (Cu) – indium (In) – gallium (Ga) diselenide (Se₂) compound, that is, a Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ – CIGS compound [3,4]. The technology of manufacturing thin-film solar cells based on CIGS has a number of advantages over the technology of obtaining silicon solar cells, one of which is the use of the conveyor technology "roll-to-roll", which allows reducing the cost of manufacturing thin film solar cells. Taking into account all of the above, it can be noted that the CIGS compound is a very promising material for the manufacture of inexpensive, non-toxic and highly efficient photoconverters of the new generation, and research conducted in this direction is relevant.

II. Methodology

In this article, studies were conducted on the influence of on a foil covered roof, on the output energy parameters of PV modules based on CIGS solar cells. The studies were conducted under normal sunlight conditions in May 2024 in Tashkent. The solar illumination power P_{rad} incident on the solar cell was 800 W/m². Under the influence of sunlight, the temperature of the solar cell changed in the range from 32°C to 60°C, at an ambient temperature of $T=32^\circ\text{C}$. The studied solar cell consisted of 36 series-connected solar cells with an effective area of 27.8×27.8 cm². The incident solar radiation power was measured using a wireless analyzer Solmetric Sol Sensor. The temperature on the surface of the solar cell was measured using a Fluke 62 MAX infrared thermometer. The load I-V characteristics of the solar cell were studied using a PROVA-210 Solar Module Analyzer.

III. Experimental results

Fig.1 and Fig.2 show the experimental results of the temperature dependence of the short-circuit current I_{sc} and the open-circuit voltage V_{oc} of CIGS photovoltaic modules [5-7]. From Fig.1 it follows that I_{sc} increases linearly with temperature in the range from 0.45 A to 0.49 A, with two slope angles. In the temperature range of 300 – 310 °K, the temperature coefficient of I_{sc} of CIGS photovoltaic modules has a value of $K_{\text{sc1}} \approx 0.051 \text{ mA/cm}^2\text{°K}$, and in the range of 310–320 °K, the temperature coefficient of I_{sc} of CIGS photovoltaic modules, $K_{\text{sc2}} \approx 0.162 \text{ mA/cm}^2\text{°K}$.

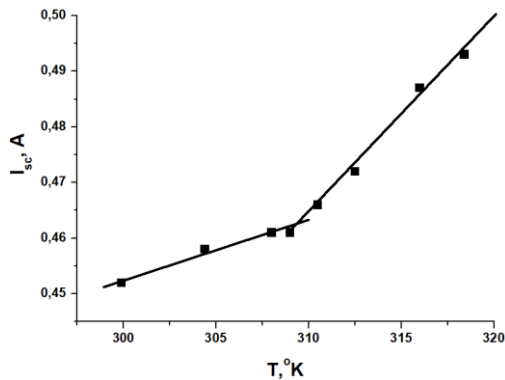


Fig.1. Temperature dependence of I_{sc} of CIGS PVM

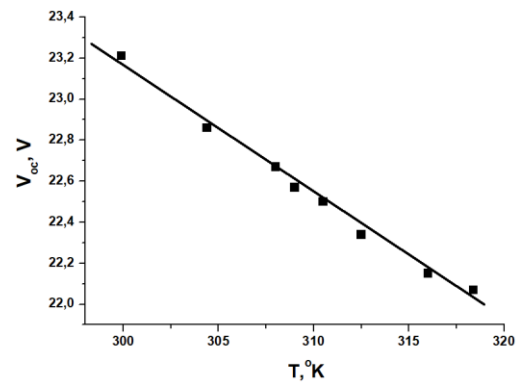


Fig.2. Temperature dependence of V_{oc} of CIGS PVM

The temperature dependence of the short-circuit current I_{sc} observed in Fig.1, with two slopes, in the second section the current increases sharply with temperature, which is associated with a decrease in the recombination of photo-generated minority charge carriers in the elevated temperature region, due to the filling of these levels with thermally generated electrons. A decrease in the recombination centers leads to recharging of defective states due to an increase in thermally generated charge carriers. In the photoactive layer of p-CIGS, they cease to act as a recombination center for minority electrons responsible for the photogeneration process. From Fig.2 it follows that V_{oc} CIGS PEM linearly decreases with increasing temperature from 23.2 V to 22.07 V, in the entire studied temperature range from 300–320 °K, with one slope, its temperature coefficient $K_{oc} \approx -1.71$ mV/°K.

The experimental results of the temperature dependence of the photocurrent I_{phmax} and the photogenerated voltage V_{phmax} shown in Fig.3 and Fig.4 were measured at the maximum output power of the CIGS photovoltaic cell. It follows from the experiment that I_{phmax} , unlike I_{sc} , increases linearly with temperature, with one slope, from 0.41 A to 0.44 A. In the temperature range of 300–320 °K, the temperature coefficient of the photocurrent of the CIGS photovoltaic cell has the value I_{phmax} , $K_{I_{phmax}} \approx 0.076$ mA/cm² °K. It is evident from

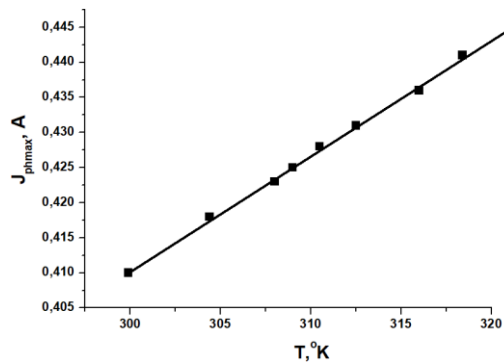


Fig.3. Temperature dependence of I_{phmax} of CIGS PVM

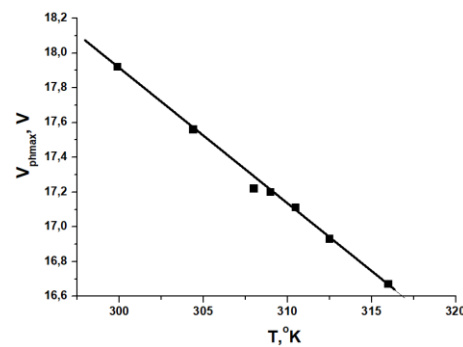


Fig.4. Temperature dependence of V_{phmax} of CIGS PVM

Fig.4 that V_{phmax} , as in the case of V_{oc} , decreases linearly from 17.9 V to 16.5 V with increasing temperature with one slope. It follows from the experiments that in the entire studied temperature range of 300 – 320 °K, the temperature coefficient of voltage $K_{V_{phmax}}$ of CIGS PV for a single element is equal to $K_{V_{phmax}} \approx -2.14$ mV/°K.

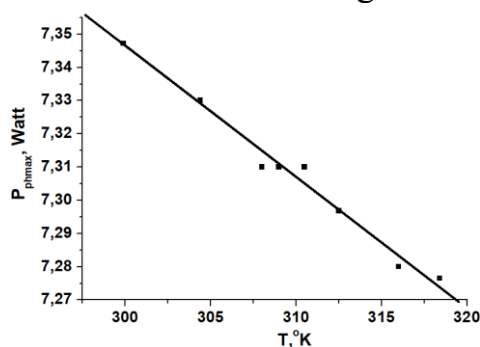


Fig.5. Temperature dependence of P_{max} of CIGS PVM

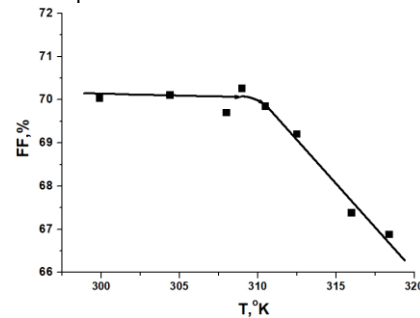


Fig.6. Temperature dependence of FF CIGS PVM

Fig.5 and Fig.6 show the experimental results of the temperature dependence of the maximum output power $P_{\max}$ and the fill factor (FF) of CIGS PV. It follows from the experiment that $P_{\max}$ decreases linearly with temperature, from 7.35 W to 7.27 W, with one slope in the temperature range of 300–320 °K, the temperature coefficient $P_{\max}$ of CIGS PV is $K_{P_{\max}} \approx -0.092 \text{ mW/cm}^2\text{/}^\circ\text{K}$. The fill factor FF of CIGS PV in Fig.6 decreases linearly with increasing temperature from 70.13 to 66.8%, in the temperature range of 310–320 K, with the temperature coefficient $K_{FF} \approx -0.4075 \text{ }^\circ\text{K}$. In the temperature range of 300–310°K, the FF of CIGS PV has a constant value of $\approx 70.13\%$.

Fig.7 shows the experimental results of the temperature dependence of the CIGS PV module efficiency. The PV efficiency decreases linearly with increasing temperature, from 12.5% to 11.45%, and a linear dependence with two slopes is observed. The CIGS PV, in the temperature range of 300–310 °K, had a temperature coefficient of efficiency $K_{\text{Eff1}} \approx -0.0342 \text{ }^\circ\text{K}$, and in the range of 310–320 °K it had a temperature coefficient of efficiency $K_{\text{Eff2}} \approx -0.0917 \text{ }^\circ\text{K}$. The conducted experimental studies have shown that the PV module based on CIGS solar cells, under conditions close to the average real illumination conditions $P_{\text{rad}} \approx 800 \text{ W/m}^2$ in the temperature range of 25–50 °C, has a negative temperature coefficient of change in efficiency $K_{\text{Eff1}} \approx -0.0342\text{ }^\circ\text{K}$ and $K_{\text{Eff2}} \approx -0.0917\text{ }^\circ\text{K}$.

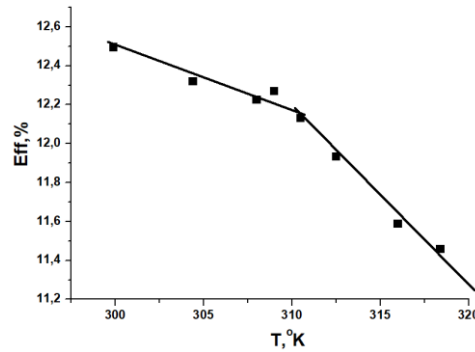


Fig.7. Temperature dependence of the efficiency of CIGS PVM

The observed experimental results of the dependence of the CIGS solar cell efficiency from Fig.7 can be explained based on the analysis of the real structure of the solar cell, by analogy with the solar cell. The real structure of the solar cell is characterized by the presence of series R_{ser} and shunt resistance R_{sh} of the CIGS solar cell.

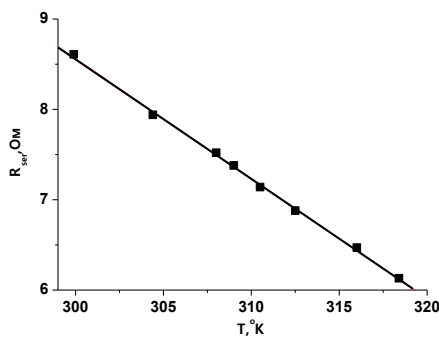


Fig.8. Temperature dependence of series resistance R_{ser} of CIGS PVM

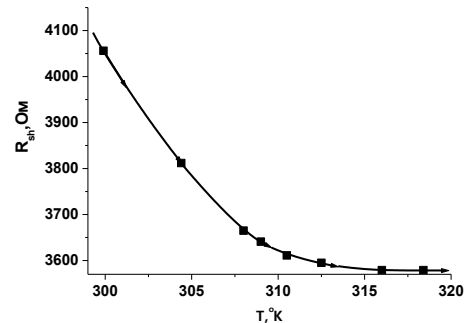


Fig.9. Temperature dependence of shunt resistance R_{sh} of CIGS PVM

Fig.8 and Fig.9 show the experimental results of the temperature dependence of the series R_{ser} and shunt resistance R_{sh} of the CIGS solar cell, calculated from the load I-V characteristic. At a temperature of $T=300^{\circ}\text{K}$, the CIGS solar cell has $R_{ser}=8.6\text{ Ohm}$ and $R_{sh}=4060\text{ Ohm}$. As expected, with increasing temperature, the values of R_{ser} and R_{sh} decrease, and at a temperature of $T=319^{\circ}\text{K}$, they have the values $R_{ser}=6\text{ Ohm}$ and $R_{sh}=3580\text{ Ohm}$, respectively, under conditions of an incident radiation power of $780 \pm 30\text{ W/m}^2$ [8-10].

Fig.8 and Fig.9 show the experimental results of the temperature dependence of the series R_{ser} and shunt resistance R_{sh} of the CIGS solar cell, calculated from the load I-V characteristic. At a temperature of $T=300^{\circ}\text{K}$, the CIGS solar cell has $R_{ser}=8.6\text{ Ohm}$ and $R_{sh}=4060\text{ Ohm}$. As expected, with increasing temperature, the values of R_{ser} and R_{sh} decrease, and at a temperature of $T=319^{\circ}\text{K}$, they have the values $R_{ser}=6\text{ Ohm}$ and $R_{sh}=3580\text{ Ohm}$, respectively, under conditions of an incident radiation power of $780 \pm 30\text{ W/m}^2$ [8-10].

IV. Conclusion and future work

The conducted experimental studies have shown that the PV module based on CIGS solar cells under conditions close to the average real conditions of solar radiation illumination $P_{rad} \approx 780 \pm 30\text{ W/m}^2$, in the temperature range of $25\text{--}50^{\circ}\text{C}$, has a negative temperature coefficient of efficiency change $K_{Eff1} \approx -0.0342\text{ \%}/^{\circ}\text{K}$ and $K_{Eff2} \approx -0.0917\text{ \%}/^{\circ}\text{K}$ from Fig. 4.7. This experimental fact is explained by the temperature dependence of R_{sh} , leading to losses of photogenerated minority charge carriers through leakage channels in the CIGS layer and a decrease in the efficiency of the PV module based on CIGS solar cells.

References

- [1] R. Jeyakumar, U.P.Singh, Ener. Envir. Sci. 10, 1306 (2017).
- [2] G.F. Novikov, M.V. Gapanovich, Uspexi fizicheskix nauk 187, 2, I73 (2017).
- [3] A. G. Komilov, B. E. Egamberdiev, R. Kabulov, Yu. Z. Nasrullayev, F. A. Akbarov. The Result of Successive Exposure to Reverse and Forward Bias on the Electrophysical Characteristics of $\text{ZnO:Al/i-ZnO/CdS/CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x(\text{S, Se})_2/\text{Mo}$ Structure Solar Cells. // Applied Solar Energy Vol.58. No.4. pp.476–481. (2022).
- [4] R.R. Kobulov, N.A. Matchanov, O.K. Ataboev, F.A. Akbarov. Applied Solar Energy. 55, 2, 83 (2019).
- [5] R.R.Kobulov, N.A.Matchanov, O.K.Ataboev, Applied Solar Energy. 54, 2, 91 (2018).
- [6] R.R. Kabulov, A.A. Alimov, F.A. Akbarov. Time of transition processes in a CdS-CIGS structural solar cells in the short-wave part of the absorption spectrum at different loading resistances. // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 14 (1). pp.127–131 (2023).
- [7] N.A. Matchanov, A.A. Mirzabaev, B.R. Umarov, M.A. Malikov, A.U. Kamoliddinov, K.A. Bobozhonov. Geliotekhnika. 4, 20 (2016).
- [8] R.R. Kabulov, N.A. Matchanov, O.K. Ataboev, F.A. Akbarov. Problemy energo- i resursosberezhniya. 3, 23, (2019)

[9] R.R. Kabulov, M.A. Makhrnudov, M.U. Khajiev, O.K. Ataboev, Applied Solar Energy. 52, N 1, 61 (2016).

[10] K. Mertens. Photovoltaics: Fundamentals, Technology and practice (John Wiley & Sons. 297, 2014).

УДК 620.91

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ НАНОКОМПОЗИТНЫЕ АБСОРБЕРЫ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ И ОПРЕСНЕНИЯ ВОДЫ В УСЛОВИЯХ КАЗАХСТАНА

Аманбаев А., Онгар Б.

Казахский национальный исследовательский технический университет имени

К. И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

*e-mail: aitumar.amanbayev@gmail.com

Аннотация. Разработана и исследована усовершенствованная система солнечного опреснения воды с использованием нанокompозитных материалов ядро-оболочка в качестве широкополосных абсорберов солнечной энергии. Показано, что такие материалы существенно повышают эффективность фототермического преобразования и скорость солнечного испарения по сравнению с традиционными нанофлюидами. Так, нанокompозиты Fe_2O_3 , графита и ZnO с плазмонными оболочками (Ag, Cu, Au, Al) увеличивают показатели испарения более чем на 60-70 %, а при интенсивном солнечном излучении (2500 Вт/м^2) демонстрируют рост скорости испарения в 7-8 раз. Снижение толщины оболочки и оптимизация размеров ядра дополнительно улучшают теплопередачу и ускоряют процессы нагрева и испарения.

Для Казахстана, где фиксируется до 3000 часов солнечного сияния в год и остро стоит проблема дефицита пресной воды (особенно в бассейне Арала и южных регионах), подобные технологии имеют особую значимость. Инновационные нанокompозиты позволяют создавать компактные и энергоэффективные солнечные дистилляторы, что открывает путь к масштабируемым и устойчивым решениям водообеспечения.

Предложенные материалы и система солнечного опреснения могут внести значительный вклад в обеспечение населения Казахстана чистой водой, развитие возобновляемой энергетики и достижение целей устойчивого развития, укрепляя водно-энергетическую безопасность страны.

Ключевые слова: солнечное опреснение, нанокompозитные абсорберы, наночастицы ядро-оболочка, фототермическое преобразование, объёмное солнечное испарение

1 Введение

Дефицит пресной воды является одной из наиболее острых глобальных проблем современности, вызванной ростом численности населения, урбанизацией, изменением климата и чрезмерным использованием природных ресурсов. Для Казахстана эта проблема стоит особенно остро: южные регионы страны (Кызылординская, Жамбылская, Туркестанская области) критически зависят от трансграничных рек Сырдарья и Или, а сокращение их стока усугубляется климатическими изменениями и хозяйственной деятельностью соседних государств. В этих условиях развитие технологий опреснения становится стратегически важным направлением для обеспечения населения чистой водой.

Одним из наиболее перспективных решений являются солнечные термальные методы опреснения, включая многоступенчатую флэш-дистилляцию и солнечные дистилляторы [1]. Несмотря на эффективность и масштабируемость таких технологий, их реализация часто сопряжена с высокой зависимостью от ископаемого топлива, что повышает экологическую нагрузку и затраты [2]. Казахстан, как страна с высоким потенциалом солнечной энергии (в среднем 2200-3000 часов солнечного сияния в год), располагает уникальными условиями для перехода к устойчивым солнечным системам опреснения, которые позволяют снизить углеродный след и эксплуатационные расходы [3].

Однако классические солнечные дистилляторы имеют ряд ограничений: низкую тепловую эффективность, медленный процесс испарения, зависимость от погодных условий и ограниченный масштаб применения. Они требуют больших земельных площадей, а также не способны аккумулировать тепло для работы в ночное время.

В последние годы всё больше внимания уделяется применению нанофлюидов - жидкостей с добавлением наночастиц, обладающих высокой теплопроводностью и улучшенными коэффициентами теплообмена. Такие растворы позволяют значительно увеличить эффективность солнечных систем, улучшить поглощение солнечного излучения и ускорить процессы испарения.

1.1 Научные пробелы и вклад данного исследования

Методы солнечной дистилляции, включая солнечные дистилляторы и активные/пассивные системы опреснения, за последние годы достигли значительного прогресса [1-3]. Однако они всё ещё сталкиваются с рядом ограничений, связанных с объёмным испарением и оптимизацией энергетической эффективности. Одним из главных недостатков является неполное использование солнечного спектра. Большинство традиционных систем эффективно улавливают ближний инфракрасный диапазон (БИД), обладающий низкой энергией фотонов, тогда как ультрафиолетовое излучение (УИ), несмотря на высокий потенциал для преобразования в тепловую энергию, остаётся недоиспользованным [4]. В результате многие установки не способны

утилизировать весь спектр солнечного излучения (250-3000 нм), что приводит к снижению производительности и ограничивает их практическую применимость.

Другим серьёзным ограничением является недостаточная эффективность нанофлюидов, которые, несмотря на улучшенные оптические свойства, всё ещё не обеспечивают полного спектрального поглощения [5]. В частности, традиционные наночастицы хорошо взаимодействуют с УИ и видимым светом, но их способность поглощать инфракрасное излучение ограничена [6]. Это снижает общую эффективность фототермического преобразования и ограничивает потенциал технологий устойчивого водоснабжения.

Южные регионы страны (Туркестанская и Кызылординская области) обладают высокой солнечной радиацией (до 3000 ч солнечного сияния в год), но при этом страдают от острого дефицита пресной воды из-за сокращения стока трансграничных рек, деградации земель и последствий Аральского кризиса. Использование технологий, которые не задействуют весь спектр солнечной энергии, приводит к потере значительной части доступного энергетического потенциала именно там, где он жизненно необходим.

Для преодоления этих ограничений активно исследуются плазмонные наночастицы и нанокомпозиты, способные расширять диапазон поглощаемого излучения от ультрафиолетовой до инфракрасной области за счёт локализованных поверхностных плазмонных резонансов [7]. Такие материалы обеспечивают более полное преобразование солнечной энергии в тепловую и открывают путь к созданию высокоэффективных солнечных дистилляторов.

В данном исследовании предлагается новая концепция, направленная на широкополосное поглощение солнечного спектра с помощью нанокомпозитов «ядро-оболочка». Эти материалы демонстрируют улучшенное светоматериальное взаимодействие и повышенную тепловую стабильность. Согласно результатам настоящей работы, подобные наноструктуры позволяют существенно увеличить скорость солнечного испарения и тепловую эффективность по сравнению с традиционными подходами [8].

Вклад данного исследования заключается в создании новой системы солнечного испарения, которая способна использовать весь спектр солнечного излучения, повышая энергетическую эффективность и производительность. Для Казахстана это имеет стратегическое значение, так как позволяет разрабатывать компактные автономные солнечные дистилляторы для сельских и степных регионов, способные решать проблему нехватки пресной воды и поддерживать устойчивое развитие водно-энергетической отрасли.

2 Методы

Данный раздел начинается с формулировки постановки задачи и подробного описания математической модели. Далее представлена численная методология, включающая исследование сходимости сетки для повышения точности решения и процедуры верификации для подтверждения достоверности и устойчивости полученных результатов.

2.1 Постановка задачи и математическая модель

Инновационная система прямого испарения воды с использованием полного спектра солнечного излучения (рис. 1а) основана на применении уникальной нанокомпозитной суспензии, обеспечивающей высокоэффективное поглощение солнечной энергии. Система улавливает излучение во всём спектральном диапазоне и осуществляет его объёмное поглощение благодаря коллоидному раствору с ядро-оболочечной структурой.

Открытая конструкция испарителя способствует эффективному тепло- и массообмену в процессе испарения, а теплоизолированные боковые и нижние стенки минимизируют теплотери, что позволяет оптимизировать удержание энергии. Как показано на рис. 1b, использование ядро-оболочечной конфигурации с интегрированными плазмонными наночастицами усиливает стабильность материала и улучшает его тепловые характеристики.

Такие наночастицы значительно повышают способность суспензии к улавливанию солнечной энергии за счёт генерации локализованных электрических полей и инициирования упругих бинарных столкновений между частицами и молекулами воды. Данный механизм приводит к ускоренному росту температуры раствора, что, в свою очередь, интенсифицирует процесс испарения и повышает общую производительность системы.

Предложенный подход, основанный на применении плазмонных наночастиц и структур типа ядро-оболочка, обеспечивает значительное повышение эффективности солнечного испарения воды и открывает новые перспективы для его использования в задачах опреснения и энергетики.

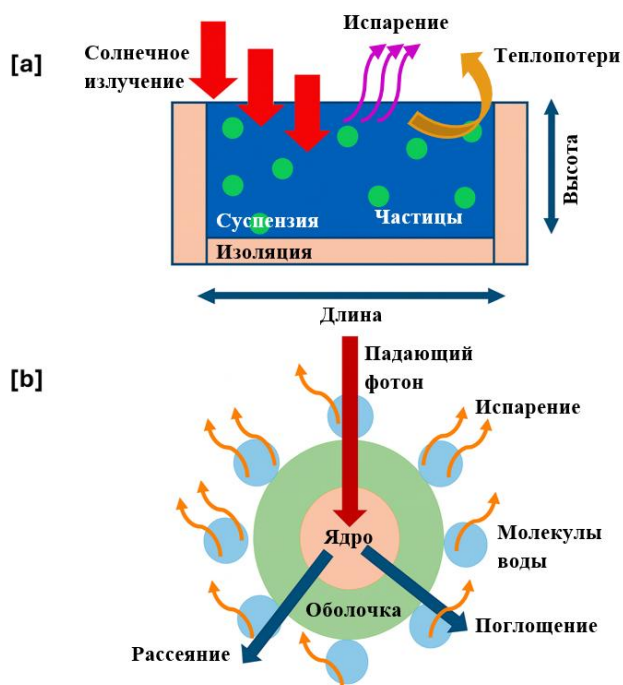


Рис. 1. - (а) Схематическое изображение системы прямого испарения под действием полного солнечного спектра с использованием новой суспензии нанокомпозитов; (б) влияние солнечного излучения на суспензию.

Для количественного описания процессов переноса тепла и массы применяется математическая модель, основанная на радиационно-тепловых уравнениях и законах сохранения. Ниже приведены ключевые формулы, используемые для анализа системы.

Уравнение переноса излучения:

$$\nabla \cdot (I_\lambda \vec{s}) + (\alpha_\lambda + \sigma_s) I_\lambda = \alpha_\lambda n^2 I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda \Phi d\Omega' \quad (1)$$

где I_λ - интенсивность излучения, α_λ - коэффициент поглощения, σ_s - коэффициент рассеяния, n - показатель преломления, Φ - фазовая функция.

Уравнения Навье-Стокса:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu \left(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T \right) \right] + \rho \vec{g} + \vec{F}_s \quad (3)$$

$$\nabla \cdot [\vec{u}(\rho E + p)] = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (4)$$

где ρ - плотность, $\vec{u}$ - скорость, p - давление, μ - вязкость, T - температура, k - теплопроводность.

Массообмен (испарение и конденсация):

$$\dot{m}_{fg} = r_i \alpha_f \rho_f \frac{T_f - T_{sat}}{T_{sat}}, \quad \dot{m}_{gf} = r_i \alpha_g \rho_g \frac{T_{sat} - T_g}{T_{sat}} \quad (5)$$

где $\dot{m}_{fg}$ - испарение, $\dot{m}_{gf}$ - конденсация, T_{sat} - температура насыщения.

Баланс энергии на поверхности:

$$q = q_{conv} + q_{rad} + q_{evap} \quad (6)$$

$$q_{conv} = h(T_s - T_{amb}), \quad q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{amb}^4), \quad q_{evap} = jL \quad (7)$$

где h - коэффициент теплоотдачи, ε - эмиссивность, σ - постоянная Стефана-Больцмана, j - скорость испарения.

Эффективность системы:

$$E_{thermal} = \frac{\vartheta_{colloid} - \vartheta_{water}}{\vartheta_{water}} \times 100\% \quad (8)$$

где ϑ - показатель (тепловой прирост или скорость испарения).

Для корректного моделирования необходимо учитывать теплофизические параметры материалов наночастиц. В таблице 1 приведены значения удельной теплоёмкости (C_p), плотности (ρ) и теплопроводности (k) для веществ, применяемых в качестве ядра (Fe_2O_3 , ZnO , графит) и оболочек (Al , Cu , Ag , Au). Эти свойства определяют процессы накопления и передачи тепла, а также влияют на эффективность фототермического преобразования.

Таблица 1. Теплофизические характеристики материалов ядра и оболочки наночастиц [9]

Вещество	C_p (Дж/кг·К)	ρ (кг/м ³)	k (Вт/м·К)
Al	900	2 700	247
Cu	383	8 954	400
Au	128.8	19 320	314.4
Графит	2 160	701	120
Fe ₂ O ₃	670	5 810	80.4
Ag	235	10 500	429
ZnO	495.2	5 600	13

Приведённые уравнения и параметры формируют сокращённую, но достаточную математическую основу для анализа солнечного испарителя на основе нанокompозитных коллоидных растворов. Модель позволяет описывать основные радиационно-тепловые эффекты, учитывать массообмен при испарении и сопоставлять эффективность традиционных жидкостей и новых многофункциональных суспензий.

2.2 Численный подход

Численная схема была реализована с использованием ANSYS Fluent, где применялся метод конечных объёмов для разбиения области на контрольные объёмы. Алгоритм SIMPLE обеспечивал точное сохранение массы и эффективное сопряжение между полями давления и скорости. Для пространственной дискретизации использовался метод Least Squares Cell-Based в сочетании с аппроксимацией второго порядка по схеме upwind, что позволило точно учитывать конвективные потоки, особенно в областях с резкими градиентами.

Метод VOF (Volume of Fluid) в неявной постановке применялся для моделирования многофазного течения и отслеживания границ фаз в динамических условиях.

Радиационный теплообмен моделировался с использованием метода дискретных ординат (Discrete Ordinates, DO), учитывающего излучение, поглощение и рассеяние в нескольких спектральных диапазонах. На начальном этапе применялось разбиение 3×3 , а для повышения точности использовалась более детализированная сетка 5×5 .

Сходимость контролировалась с критериями 10^{-6} для уравнений энергии и радиационного переноса и 10^{-5} для уравнений скорости и неразрывности, что обеспечивало надёжность результатов при минимальных численных погрешностях.

3 Результаты и обсуждение

Данный раздел открывается подробным анализом оптических свойств наноструктур типа «ядро-оболочка», созданных на основе Fe₂O₃, графита и ZnO, каждая из которых была инкапсулирована в различные плазмонные материалы оболочки. Основное внимание уделяется тому, как выбор материала оболочки влияет на оптические характеристики этих нанокompозитов.

Затем исследование переходит к детальному рассмотрению тепловой эффективности данных систем, которая основана на их усовершенствованных оптических свойствах. Дополнительно проводится тщательный анализ термофизических и радиационных характеристик систем.

С учётом совокупного влияния этих факторов исследование рассматривает сравнительный анализ новых характеристик теплопереноса наноструктур «ядро-оболочка» и традиционных наноплюидов. Помимо этого, детально изучается влияние размеров ядра и оболочки, а также интенсивности солнечного излучения на общую производительность систем.

3.1 Оптические радиационные свойства многофункциональных композитных наноматериалов

В случаях, когда солнечная радиация напрямую поглощается жидкой средой, решающую роль начинают играть оптические свойства материалов. Солнечный спектр условно делится на три диапазона: ближний инфракрасный диапазон (БИД), который содержит около 50 % энергии, видимый свет - примерно 45 % и ультрафиолетовое излучение (УИ) - около 5 %. Традиционные наночастицы и композитные наноструктуры демонстрируют разные механизмы взаимодействия с этими спектральными зонами, что обусловлено их внутренними свойствами.

Средние коэффициенты экстинкции для классических наночастиц, таких как Fe_2O_3 , графит и ZnO , сравнительно невелики, что связано с их ограниченными оптическими откликами (рис. 2). В частности, наночастицы Fe_2O_3 и ZnO показывают минимальное поглощение в БИД вследствие низких диэлектрических констант, тогда как графитовые наночастицы проявляют существенно более высокие коэффициенты затухания во всём спектральном диапазоне.

Однако сравнительно низкая оптическая эффективность традиционных наночастиц обуславливает необходимость разработки усовершенствованных материалов с улучшенными характеристиками поглощения света. Решением становятся плазмонные наноструктуры - материалы, обладающие высокими оптическими свойствами благодаря металлической природе. Путём покрытия наночастиц Fe_2O_3 , графита и ZnO плазмонными металлами, такими как Ag , Cu , Au и Al , формируются композиты с архитектурой «ядро-оболочка». Эти материалы сочетают свойства ядра и металлической оболочки, образуя многофункциональные наноматериалы с улучшенными оптическими характеристиками. Такие нанокompозиты демонстрируют существенно более высокое поглощение солнечной энергии, особенно в диапазоне БИД (рис. 2).

Металлические оболочки состоят из наночастиц, чьи свободные электроны проводят ток и становятся особенно динамичными под действием солнечного излучения. Эти возбужденные электроны участвуют в коллективных осцилляциях, которые расширяют диапазон захватываемого солнечного спектра и формируют выраженные пики на спектре поглощения за счёт явления поверхностного плазмонного резонанса (ППР).

ППР представляет собой коллективное колебание свободных электронов внутри металлической наночастицы в ответ на падающее электромагнитное

поле. Характер плазмонных осцилляций сильно зависит от локальной среды и архитектуры наноструктуры, порождая различные резонансные эффекты. Особенно значимая роль принадлежит локализованному поверхностному плазмонному резонансу (ЛППР), который существенно усиливает оптический отклик наночастиц. Под действием света электромагнитное поле вызывает колебания электронов проводимости, вынуждая их резонировать с падающей волной. При этом кулоновское притяжение между ядрами атомов и электронами формирует восстанавливающую силу, что усиливает рассеяние света и взаимодействие материала с излучением (рис. 2).

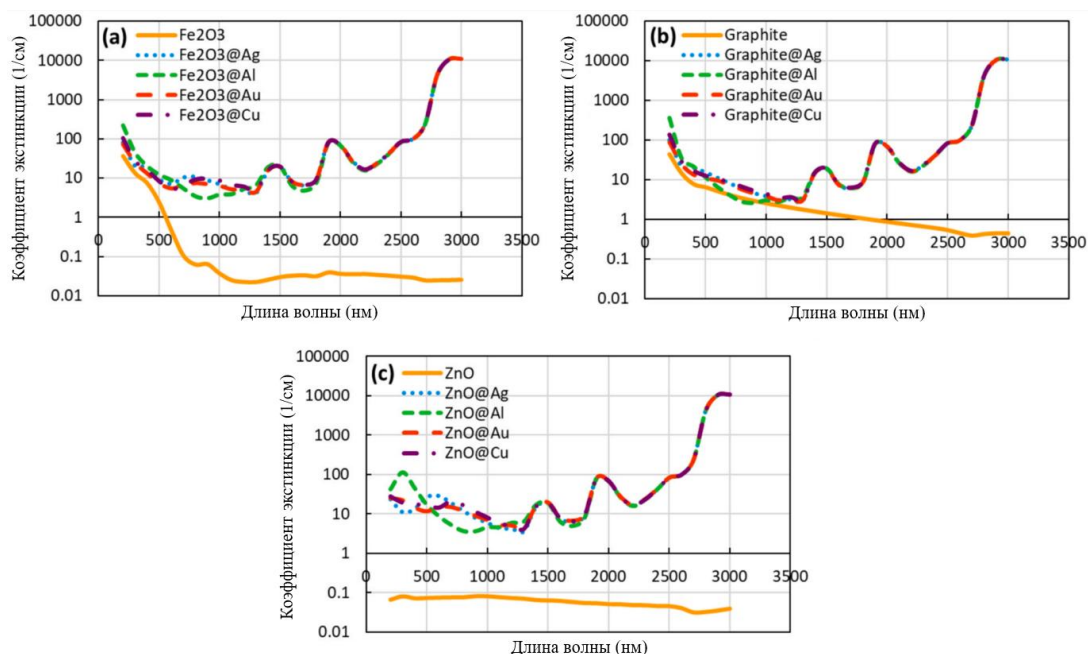


Рис. 2. - Влияние нанокомпозитных материалов на коэффициент экстинкции

Покрывание наночастиц плазмонной оболочкой значительно улучшает их оптические свойства, особенно за счёт увеличения интенсивности рассеяния света по сравнению с «голыми» наночастицами. Такое усиление приводит к выраженным пикам рассеяния и улучшает общий оптический отклик. Наноструктуры «ядро-оболочка», сочетающие улучшенные характеристики оболочки с устойчивостью ядра, демонстрируют более высокую способность к поглощению и преобразованию солнечного излучения. Эти многофункциональные материалы обладают большим потенциалом для применения в технологиях преобразования солнечной энергии, где важнейшими параметрами являются эффективное поглощение и использование солнечного света.

3.2 Сравнительный анализ новых коллоидных растворов и традиционных нанофлюидов

Коллоидные суспензии на основе многофункциональных нанокомпозитных материалов, выступающие в роли новых теплопереносных жидкостей, были сопоставлены с традиционными нанофлюидами для оценки их потенциала в повышении эффективности использования солнечной энергии.

Традиционные нанофлюиды, такие как Fe_2O_3 , графит и ZnO , синтезируются путём равномерного распределения этих наночастиц в воде, которая играет роль дисперсионной среды. В отличие от них, коллоидные суспензии на основе многофункциональных нанокompозитов включают инкапсуляцию этих наночастиц плазмонными материалами - Ag , Cu , Au и Al , что формирует усовершенствованные наноструктуры типа «ядро-оболочка». Такие частицы равномерно распределяются в воде, создавая новые теплоносители, специально разработанные для более эффективного захвата и переноса энергии.

Поглощение солнечной энергии наночастицами Fe_2O_3 , графита и ZnO приводит к увеличению температуры жидкости на 42,62; 40,35 и 16,52 % соответственно по сравнению с чистой водой (рис. 3). Тепловые накопления для этих нанофлюидов возрастают с 102,56 кДж/кг (вода) до 146,23; 143,92 и 119,47 кДж/кг. Соответственно, скорость солнечного испарения увеличивается на 67,18; 63,24 и 26,22 %. Однако эффективность таких традиционных систем в преобразовании света в тепло и в процессах испарения ограничена внутренними свойствами используемых наночастиц. Именно здесь на первый план выходят плазмонные наночастицы, обладающие высоким потенциалом для улучшения этих характеристик.

Ядро-оболочка структуры на основе ZnO - ZnO@Ag , ZnO@Au , ZnO@Al и ZnO@Cu - демонстрируют значительные улучшения в характеристиках теплоносителей. Эти усовершенствованные наночастицы обеспечивают повышение температуры на 73,44; 74,82; 62,14 и 76,84 % соответственно по сравнению с чистой водой (рис. 3). Существенный рост температуры связан с плазмонными свойствами материалов оболочки. При воздействии света такие наночастицы проявляют локализованный поверхностный плазмонный резонанс (ЛППР), что приводит к генерации колебательной энергии. Этот механизм резонанса позволяет частицам поглощать больше солнечного излучения и более эффективно передавать энергию в окружающую жидкость. Как показано на рис. 2, усиленное поглощение энергии приводит к увеличению энергии столкновений наночастиц, дополнительно повышая температуру жидкости по сравнению с традиционными наночастицами.

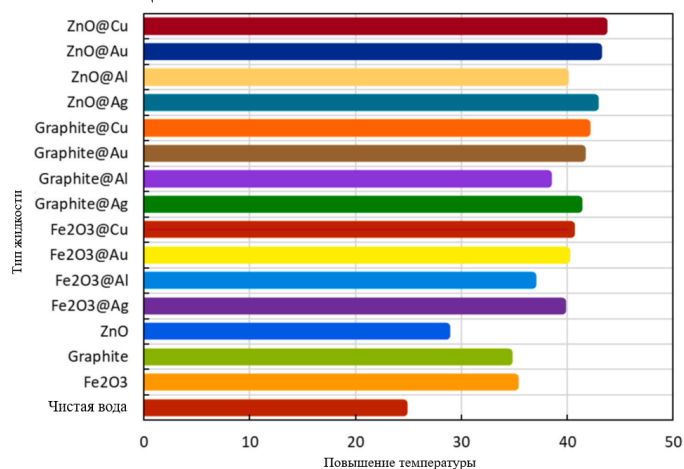


Рис. 3. - Сравнение тепловых характеристик суспензий на основе нанокompозитов ядро–оболочка и традиционных нанофлюидов

Благодаря улучшенным теплофизическим свойствам новые жидкости обладают более высокой способностью к испарению. В результате тепловое накопление системы значительно возрастает до 161,08; 161,95; 152,1 и 164,76 кДж/кг для ZnO@Ag, ZnO@Au, ZnO@Al и ZnO@Cu соответственно. Повышенное поглощение солнечной энергии за счёт резонансного взаимодействия между падающим светом и свободными электронами в плазменной оболочке приводит к более высокому локальному нагреву и более эффективному испарению.

В целом, скорость солнечного испарения этих нанофлюидов типа «ядро-оболочка» показывает значительное улучшение - на 128,89; 132,04; 104,42 и 136,69 % соответственно по сравнению с чистой водой. Эти результаты ясно демонстрируют, что интеграция плазменных материалов оболочки в наноструктуры «ядро-оболочка» не только усиливает захват тепловой энергии, но и оптимизирует эффективность её преобразования за счёт улучшенного свет-материального взаимодействия.

3.3 Влияние размера ядра на фототермическое преобразование и характеристики солнечного испарения

Эффективность преобразования солнечной энергии и процессов испарения зависит от целого ряда факторов, среди которых оптические свойства материалов играют важную роль, однако не менее значимыми являются их термофизические характеристики. Такие параметры, как удельная теплоёмкость, теплопроводность и коэффициенты теплопередачи нанофлюидов, оказывают заметное влияние на производительность системы. Различия в этих свойствах могут как усиливать, так и ограничивать способность раствора к накоплению и удержанию тепла. Следовательно, корректная оценка солнечных систем должна учитывать комплексный анализ как оптических, так и термофизических характеристик коллоидных растворов, поскольку их взаимодействие напрямую определяет эффективность всей системы.

Как показано на рис. 4(а, с, е), многофункциональные композиты на основе Fe₂O₃, графита и ZnO, покрытые оболочкой из алюминия, демонстрируют наименьший прирост тепловой энергии, что связано с их сравнительно скромным ростом температуры. Это поведение нельзя объяснить исключительно оптическими свойствами плазменных наночастиц алюминия. В действительности частицы Al, обладающие наименьшей теплопроводностью среди плазменных наноматериалов, обеспечивают слабую теплопередачу между молекулами воды, что замедляет рост температуры в системе. Алюминиевая оболочка снижает общую теплопроводность между материалом и жидкой средой, препятствуя эффективной передаче тепла. Несмотря на то, что Al имеет наибольшую удельную теплоёмкость среди плазменных материалов, позволяющую ему накапливать и удерживать тепловую энергию, этот фактор вносит компромисс в эффективность солнечного испарения: высокая теплоёмкость замедляет рост температуры частиц и, соответственно,

ограничивает теплопередачу. В результате наблюдается замедление процесса испарения, что видно на рис. 4(b, d, f).

Эти результаты подчёркивают ключевую роль размера наночастиц в оптимизации работы коллоидных растворов. Полученные данные согласуются с результатами Ashraf и др. [10], показавших, что более крупные наночастицы склонны к агрегации, что снижает их способность эффективно взаимодействовать с молекулами жидкости.

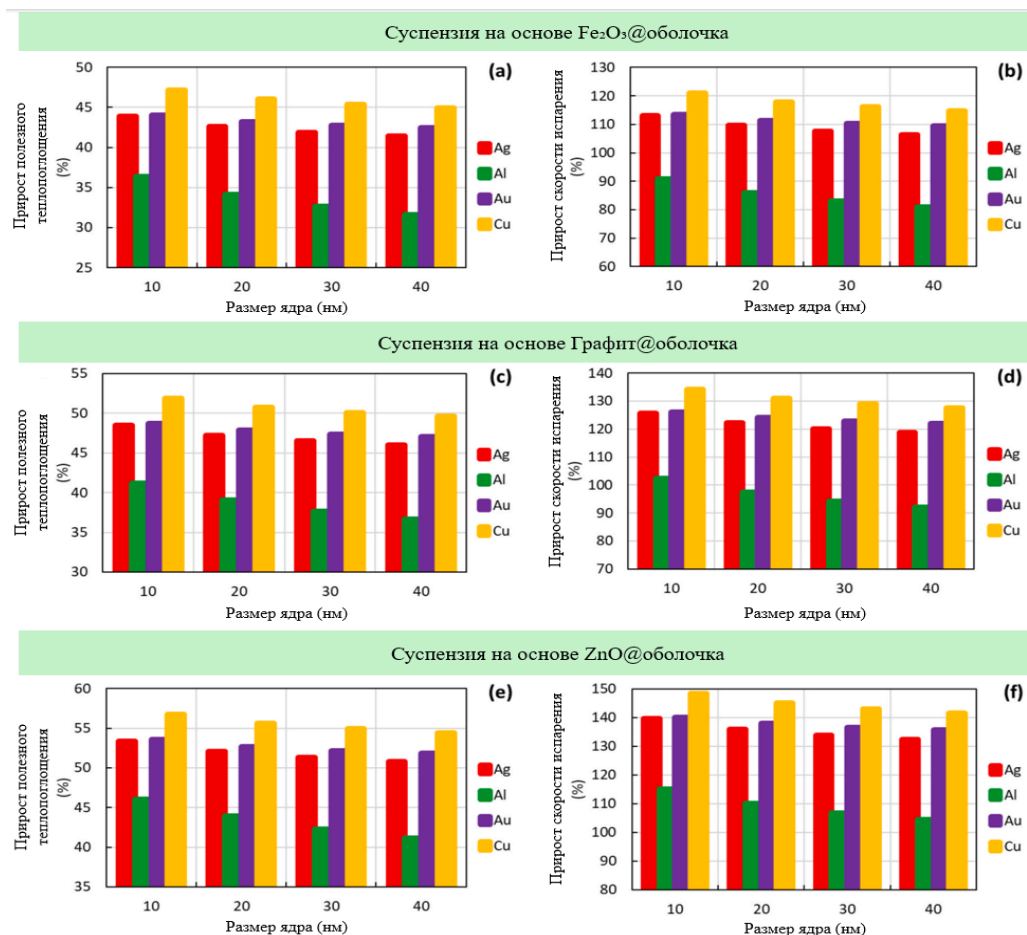


Рис. 4. - Влияние размера ядра на тепловые характеристики коллоидных растворов

3.4 Влияние толщины оболочки на фототермическое преобразование и характеристики солнечного испарения

Помимо размеров ядра нанокompозитных материалов, толщина оболочки играет ключевую роль в формировании как термофизических, так и оптических свойств, поэтому важно оценить, как её вариации отражаются на общей эффективности систем солнечного испарения.

Наночастицы Fe_2O_3 , графита и ZnO , покрытые слоем меди, показали наибольший рост температуры в своих коллоидных растворах. Эти существенные температурные приращения (рис. 5a, c, e) усиливают теплопоглощение композитов Fe_2O_3 @Cu, Графит@Cu и ZnO @Cu, позволяя им достигать оптимальной производительности для солнечного испарения (рис. 5b, d, f). Подобная

эффективность объясняется усиленным теплопоглощением при повышенных температурах, что значительно улучшает способность материалов преобразовывать солнечное излучение в тепловую энергию. Увеличение температуры способствует большему накоплению энергии, благодаря чему больше тепла становится доступным для испарения. Это напрямую повышает потенциал системы к эффективному солнечному испарению, позволяя материалам более эффективно улавливать солнечное излучение и преобразовывать его в испарительное тепло.

Как видно на рис. 5, уменьшение толщины оболочки многофункциональных нанокомпозитов значительно улучшает термическую эффективность за счёт увеличения отношения поверхности к объёму. Большая удельная поверхность способствует более интенсивному взаимодействию частиц с окружающей жидкостью, улучшает теплоперенос и снижает склонность к агрегации. Это приводит к ускорению подвижности наночастиц, более эффективной передаче энергии базовой жидкости и быстрому росту её температуры. Таким образом, создаётся большой температурный градиент, который усиливает скорость фазового перехода вода-пар.

Снижение теплового сопротивления и оптимизация динамики теплопереноса за счёт тонких оболочек позволяют более эффективно преобразовывать солнечное излучение в энергию, необходимую для быстрого испарения. В результате система работает значительно эффективнее, что подчёркивает важность оптимизации толщины оболочки при проектировании нанокомпозитных материалов для солнечных систем испарения.

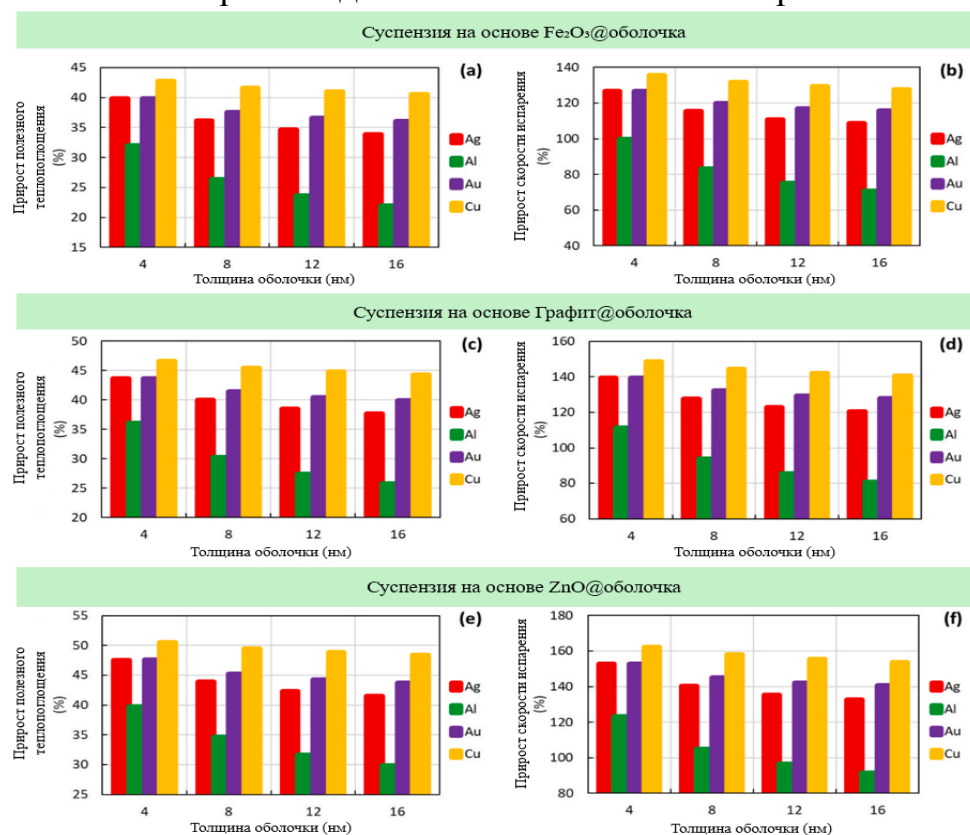


Рис. 5. - Влияние толщины оболочки на тепловые характеристики коллоидных растворов

3.5 Влияние солнечного теплового потока на фототермическое преобразование и характеристики солнечного испарения

Падающее солнечное излучение играет ключевую роль в определении эффективности систем преобразования солнечной энергии, включая установки солнечного испарения. Интенсивность солнечной радиации изменяется в течение дня в зависимости от положения Земли относительно Солнца, достигая максимума в полдень, когда солнце находится в зените. Эти колебания особенно важны для систем солнечного испарения, так как именно энергия солнечного света обеспечивает нагрев жидкости и переход её из жидкого состояния в паровую фазу.

В данном исследовании систематически рассмотрены пять уровней солнечного теплового потока - 500, 1000, 1500, 2000 и 2500 Вт/м², чтобы оценить работу системы при различных условиях освещённости. С ростом интенсивности солнечного излучения большее количество энергии проникает в систему, что значительно улучшает её способность поглощать и преобразовывать энергию в тепло. Этот процесс напрямую влияет на эффективность механизма испарения, где поглощённое тепло повышает температуру рабочей жидкости и ускоряет фазовый переход жидкость-пар.

Плазмонные наночастицы меди, нанесённые на материалы с ядром из Fe₂O₃, графита и ZnO, продемонстрировали высокую эффективность при работе на повышенных уровнях солнечного потока благодаря своим уникальным оптическим свойствам. Они эффективно поглощают и преобразуют интенсивное солнечное излучение в тепловую энергию. В результате накопление тепла в таких суспензиях существенно превосходит показатели чистой воды. Как показано на рис. 6а, это выражается в значительном увеличении температуры рабочей жидкости, что облегчает теплоперенос в системе и ускоряет фазовый переход. На рис. 6б видно, что это напрямую отражается на росте скорости испарения.

На рисунке 6а также прослеживается тенденция снижения темпов улучшения теплового накопления при дальнейшем увеличении интенсивности излучения. Например, при росте радиации от 500 до 2500 Вт/м² тепловое накопление чистой воды увеличивается с 44,11 до 228,15 кДж/кг, тогда как для раствора ZnO@Cu - с 109,23 до 338,79 кДж/кг. При этом скорость прироста уменьшается с 147,64 до 48,49 кДж/кг, что свидетельствует о снижении отдачи (diminishing returns) на высоких уровнях радиации. Аналогичный эффект наблюдается и для Fe₂O₃@Cu: тепловое накопление возрастает с 97,67 до 327,17 кДж/кг, но прирост замедляется с 121,43 до 43,4 кДж/кг.

Такое поведение объясняется эффектом насыщения: при высоких уровнях радиации способность нанокомпозитов поглощать и преобразовывать энергию ограничивается их тепловой ёмкостью, которая ниже, чем у воды. В результате дальнейшее увеличение интенсивности излучения не приводит к пропорциональному росту эффективности. Это подчёркивает сложный характер взаимосвязи между интенсивностью солнечной радиации и производительностью системы, указывая на необходимость оптимизации

свойств наноматериалов и конструкции установки для работы в разных условиях освещённости.

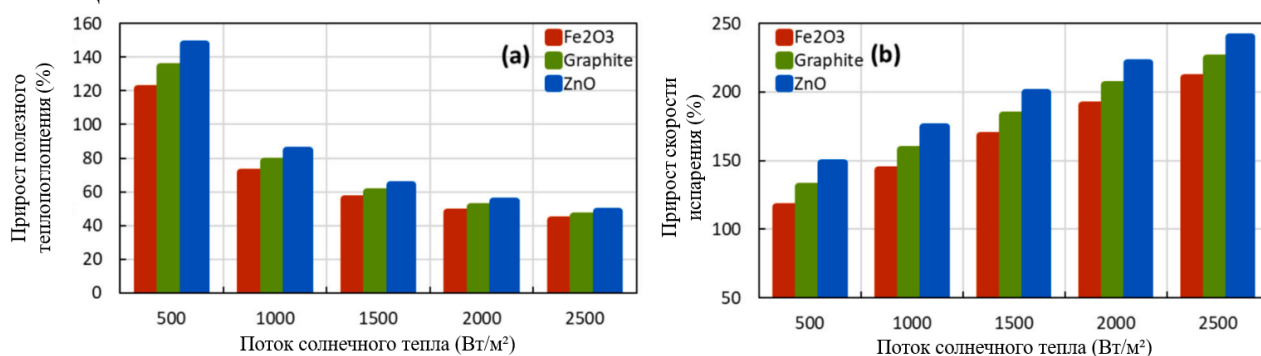


Рис. 6. – Влияние солнечного теплового потока на тепловые характеристики коллоидных растворов

3.6 Сравнение с существующими исследованиями солнечного испарения воды

Для эффективного сопоставления предложенного подхода с существующими исследованиями был проведён обзор соответствующей литературы, в частности работ Niu и др. [11] и Wang и др. [12], посвящённых межфазному (интерфейсному) солнечному испарению. В их методике солнечная энергия поглощается фототермическими материалами, расположенными на границе раздела вода-воздух. Такой подход обеспечивает максимальное локальное нагревание, снижая теплотери в объём жидкости. В отличие от этого, в нашем исследовании используется объёмное солнечное поглощение, при котором фототермические наночастицы равномерно распределяются в объёме воды, что позволяет солнечному свету проникать глубже и обеспечивать более равномерное поглощение тепла.

С учётом фундаментальных различий между межфазным и объёмным испарением прямое сравнение не является полностью корректным, однако оно остаётся ценным для выявления преимуществ и ограничений каждой техники. Так, в работе Niu и др. [11] слой хлопчатобумажной ткани, модифицированной MnO_2 , обеспечил скорость испарения $2,11 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, что примерно в 3,5 раза выше, чем у чистой воды ($0,6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$), что соответствует повышению на 251,67 % при однократной солнечной интенсивности. Аналогично, Wang и др. [12] разработали испарители на основе графена с морфологией «гортензии» и получили скорости испарения 1,32, 1,93, 3,00 и $2,77 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ для хлопка, HG-500, HG-600 и HG-700 соответственно, по сравнению с $0,96 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ для чистой воды. Эти улучшения варьировались от 37,5 до 212,5 % при одинаковых условиях освещения.

В отличие от этого, в нашем исследовании акцент сделан на объёмное солнечное испарение, при котором тепло распределяется по всему объёму жидкости, а не концентрируется только на поверхности.

Хотя абсолютные скорости испарения в нашей работе ниже, чем у методик межфазного испарения, это объясняется фундаментальными различиями в механизмах. Межфазное испарение более эффективно в повышении скорости благодаря ограничению поглощения тепла верхним слоем воды и минимизации

теплопотерь в объём. Однако объёмное поглощение, несмотря на меньшую абсолютную скорость, имеет свои преимущества - равномерное распределение тепла в жидкости.

Сравнение показывает, что композиты $\text{Fe}_2\text{O}_3@\text{Cu}$, Графит $@\text{Cu}$ и $\text{ZnO}@\text{Cu}$ обеспечивают лучшее повышение эффективности объёмного солнечного испарения по сравнению с ранее предложенными системами. Эти результаты подчёркивают потенциал разработанных материалов для значительного улучшения фототермического испарения воды. Благодаря высокой эффективности такие нанокompозиты могут быть оптимизированы для масштабных приложений, включая солнечное опреснение и очистку сточных вод.

4 Заключение

В данной работе представлена усовершенствованная система солнечного опреснения воды, использующая полный спектр солнечного излучения. Теплоноситель функционирует как широкополосный солнечный абсорбер за счёт диспергированных нанокompозитов с ядро-оболочечной структурой. Результаты численного анализа показали, что такие материалы значительно повышают эффективность фототермического преобразования и скорость испарения по сравнению с традиционными нанофлюидами.

Применение нанокompозитов на основе Fe_2O_3 , графита и ZnO с плазмонными оболочками (Ag, Cu, Au, Al) позволило увеличить скорости испарения на десятки процентов, а в отдельных случаях (например, $\text{ZnO}@\text{Cu}$) - более чем в 7-8 раз при высокой солнечной радиации. Снижение толщины оболочки и оптимизация размеров ядра дополнительно усилили теплопередачу и интенсифицировали процессы испарения. Эти результаты демонстрируют значительный потенциал новых материалов в задачах солнечной дистилляции.

Юг и запад Казахстана сталкиваются с серьёзным дефицитом пресной воды, который усугубляется изменением климата и ростом потребностей в сельском хозяйстве и промышленности. В этих условиях использование солнечных нанокompозитных технологий опреснения может стать устойчивым решением проблемы водообеспечения, одновременно снижая нагрузку на традиционные энергоресурсы.

В дальнейшем необходимы экспериментальные исследования:

- 1) Тестирование систем на солёных и минерализованных водах Аральского бассейна, Каспийского региона и подземных вод юга страны;
- 2) Оценка энергетической эффективности при характерных климатических условиях (летние температуры выше 40°C и высокая солнечная радиация);
- 3) Анализ качества получаемой воды с точки зрения ионного состава и пригодности для питьевых и сельскохозяйственных нужд.

Разработанные нанокompозитные материалы и предложенная система могут стать ключевой технологией для обеспечения устойчивого водоснабжения в Казахстане, сочетая в себе высокую энергетическую эффективность, экологическую чистоту и масштабируемость.

Список литературы

1. J. Huang, H. Zheng, H. Kong, Основные пути для эффективного солнечного термического опреснения, *Energ. Conver. Manage.* 299 (2024) 117806.
2. Z. Hu, Y. Chen, Достижения в области устойчивого опреснения с использованием океанической тепловой энергии: обзор, *Desalination* 586 (2024) 117770.
3. M. Ghazy, A.E. Zohir, E.S. Ali, A.S. Alsaman, A.M. Farid, H.H. El-Ghetany, A.A. Askalany, Современные солнечные адсорбционные системы опреснения воды, *Energy Nexus* 15 (2024) 100319.
4. M.A. Siregar, F.H. Napitupulu, T.B. Nur, H. Ambarita, Экспериментальное исследование работоспособности солнечных дистилляторов в Индонезии с использованием испарительных крышек и коллекторов без углов, *Results Eng.* 24 (2024) 103011.
5. G. Singh, P.K. Singh, A. Saxena, N. Kumar, D.B. Singh, Исследование конического пассивного солнечного дистиллятора с учетом энергетических показателей, эффективности и анализа чувствительности для устойчивой солнечной дистилляции, *J. Clean. Prod.* 434 (2024) 139949.
6. E. Mandev, B. Muratçobanoglu, A. Çelik, M.A. Ceviz, G.D. Nicola, F. Afshari, Повышение эффективности солнечных дистилляторов за счет интеграции целлюлозных водопоглотителей и термоэлектрического блока конденсации (Пельтье), *Therm. Sci. Eng. Prog.* 49 (2024) 102475.
7. C. Zhu, D. Wang, S. Bu, Z. Wu, J. Zhang, Q. Wang, Интегрированная система объемного солнечного испарения с наножидкостями и пероксидисульфатом для испарения воды и удаления органических загрязнителей, *Water Res.* X 26 (2025) 100293.
8. N.V. Canh, N.T.N. Hang, N.T. Cuong, N.H. Hoa, C.T.A. Tuyet, N.N. Ha, L.T.H. Phong, P.H. Le, T.L. Luu, V.-D. Dao, V. Nguyen, Интерфейсная наножидкость на основе углеродных наноточек для высокоэффективного солнечного испарения воды, *Diam. Relat. Mater.* 149 (2024) 111551.
9. A. Kamyar, R. Saidur, M. Hasanuzzaman, Применение вычислительной гидродинамики (CFD) для нанофлюидов, *Int. J. Heat Mass Transf.* 55 (15–16) (2012) 4104–4115.
10. M.A. Ashraf, W. Peng, Y. Zare, K.Y. Rhee, Влияние размера и агрегации/агломерации наночастиц на межфазные свойства и прочность на растяжение полимерных нанокомпозитов, *Nanoscale Res. Lett.* 13 (214) (2018).
11. R. Niu, J. Ren, J.J. Koh, L. Chen, J. Gong, J. Qu, X. Xu, J. Azadmanjiri, J. Min, Биовдохновлённый сэндвич-структурированный круглосуточный солнечный испаритель для синергетического получения чистой воды и электроэнергии, *Adv. Energy Mater.* 13 (45) (2023) 2302451.
12. H. Wang, X. Wen, K. Liu, Q. Liu, G. Hu, H. Liu, Y. She, R. Niu, T. Tang, J. Gon, Межфазное солнечное парообразование и совместная выработка электроэнергии с использованием гидрангееподобного графена, полученного методом карбонизации полимолочной кислоты, *SusMat* 4 (6) (2024) e242.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНО ОСЕВОГО ВЕТРОДВИГАТЕЛЯ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НА ФИЗИЧЕСКОМ СТЕНДЕ

Агимов Т.Н.

НАО «Алматинский университет энергетики и связи», Алматы, Казахстан
e-mail: t.agimov@aes.kz

Аннотация: Высокий потенциал ветровых ресурсов и большое количество удаленных населенных пунктов в Казахстане поддерживает интерес к ветряным электроустановкам. Вертикально-осевая ветряная турбина Болотова максимально адаптирована к ветровым режимам с диапазоном рабочих скоростей ветра от 3 до 30 м/с. Это турбина с поперечным потоком. Известные конструкции генераторов не могут обеспечить оптимальный режим турбины с максимальной генерацией в рабочем диапазоне скоростей ветра. В Казахстане нет собственного производства генераторов. Поэтому предлагается вторичное использование списанных автомобильных генераторов. Генераторы с многоуровневыми выпрямителями максимально согласованы с ветряными турбинами, в особенности с турбинами малой мощности и поперечным потоком без автоматизированных систем ограничения частоты вращения. Результаты испытаний на физическом стенде дали хорошую сходимость с математическим моделированием на платформе Excel. После оценки адекватности математической модели проведен анализ вариантов перемотки якорной обмотки на различное количество параллельных ветвей, расчетной мощности и частоты вращения. Оценено влияние расчетных данных на производительность генераторов в составе с ветряной турбиной. При оценке эффективности ветряной турбины на всех скоростях ветра соответствовала оптимальной, а КПД генератора изменялся соответственно расчетам. Минимальная величина удовлетворительным КПД превышала 50 %. Выработаны рекомендации по выбору расчетных параметров генератора для работы в составе с ветряной турбиной малой мощности.

Ключевые слова: синхронный генератор с многоуровневым выпрямителем; генератор для малых ветряных турбин; ветряные турбины с поперечным потоком

1. Введение

Уровень обеспеченности электроэнергией населенных пунктов в Казахстане в 2022 году составил 99,1% [1, 2]. Не электрифицированными остаются населенные пункты, удаленные на значительное расстояние от централизованных электрических сетей. Единственным экономически эффективным способом электроснабжения является автономное электроснабжение с использованием ВИЭ. В Республике известны и исследованы более десяти мест со средней годовой скоростью ветра 8–10 м/с,

являющихся богатыми «месторождениями» энергии. Особенность ветрового режима в Казахстане заключается в непрерывном изменении направления и скорости ветра в течение десятков секунд от 2-3 м/с до штормовых 30-40 м/с [3]. В таких ветровых режимах и вблизи населенных пунктов эффективна вертикально-осевая турбина с поперечным потоком. Она имеет высокий пусковой момент, низкий уровень шума, не требует дополнительной манипуляции для запуска при минимальной скорости ветра в 2-3 м/с [4-7].

Исследования по повышению эффективности ветряной турбины данного типа продолжаются [4-6, 9, 10], которые посвящены совершенствованию аэродинамических характеристик. На рисунке 1 приведена конструкция вертикально роторной турбины Болотова [11]. Она состоит из внешнего неподвижного диффузора и расположенного внутри него вращающегося ротора, лопатки которого, образуют активную и реактивную ступени турбины.



Рис. 1. - Конструкция ветряной турбины ВРТБ.

Диффузор и ротор имеет лопатки, равномерно расположенные по его периметру, и имеют фиксированное положение [8-11]. Общей особенностью ветряных турбин с поперечным потоком является отсутствие механических устройств регулирования аэродинамического момента и частоты вращения. Мощность ветродвигателя изменяется пропорционально кубу скорости ветра [12], при этом частота вращения ветродвигателя тоже изменяется. По причине отсутствия элементов регулирования частоты вращения, она будет изменяться пропорционально скорости ветра. От соотношения скорости ветра и частоты вращения зависит коэффициент эффективности турбины. С одной стороны отсутствие элементов регулирования частоты вращения упрощает конструкцию, а с другой стороны усложняет процесс регулирования. При изменении скорости ветра от 3 до 24 м/с мощность ветряной турбины вырасти в 512 раз, частот вращения в 8 раз.

В малых удаленных объектах востребованы компактные установки. На фоне большого количества подлежащих утилизации автомобилей, исправные комплектующие поступают на рынок в итоге возникает избыток невостребованных исправных генераторов. Модернизация автомобильного генератора и дальнейшее использование в ветряных установках до 5 кВт или автономных генераторах снизит стоимость энергетической установки и не потребует его переработку. Вышеперечисленные авторы рассматривали ветряную турбину или генераторы с точки зрения работы в сеть. Нет оценки эффективности ветряной турбины в целом, которая вытекает из степени согласованности их характеристик.

Цель статьи исследовать согласованность характеристик вертикально-осевой турбины Болотова (ВРТБ) [6] с характеристиками универсального генератора с широким диапазоном рабочих частот вращения и определить пути оптимизации автомобильных генераторов [18].

Оценить зависимость КПД генератора от расчётной номинальной мощности, частоты вращения и числа выпрямительных модулей, оценить повышение производительности генератора со ступенчатым выпрямителем и традиционным выпрямителем.

2. Генератор с многоуровневым выпрямителем

Генератор состоит из синхронной машины с якорной обмотки из нескольких параллельных ветвей, каждая параллельная ветвь подключена своему выпрямителю и образуют выпрямительный модуль. Выпрямительные модули подключены к потребителю через диоды, а между положительными и отрицательными выводами выпрямительных модулей включены коммутирующие ключи. Они с диодами производят последовательное и параллельное подключение выпрямительных модулей между собой, что позволяет суммировать и делить выходное напряжение генератора.

Звено постоянного тока преобразует переменный ток с «плавающей» частотой от синхронного генератора в постоянный ток, а затем инвертирует в переменный ток с постоянной частотой. Отсутствие прямого подключения синхронного генератора к мощной сети и независимость выходной частоты тока от скорости ветра (частоты вращения) дает возможность обеспечить оптимальную загрузку ветродвигателя ВРТБ при широком диапазоне изменении рабочей скорости. Ограничение диапазона будет определяться способностью генератора поддерживать постоянство выходного напряжения при переменной частоте вращения и способностью инвертора сохранять высокий коэффициент полезного действия при широком диапазоне изменения мощности. Согласно общеизвестной формуле ЭДС генератора рассчитывается по формуле:

$$E_{\Gamma} = 4,44 \cdot f \cdot W_{\phi 1} \cdot \Phi = 4,44 \frac{p \cdot n}{60} W_{\phi 1} \cdot \alpha \cdot \tau \cdot l \cdot B_{\delta} = 4,44 \frac{p \cdot \tau \cdot l \cdot \alpha}{60} W_{\phi 1} \cdot n \cdot B_{\delta} = K_{\Gamma} \cdot W_{\phi 1} \cdot n \cdot B_{\delta} \quad (1)$$

где $W_{\phi 1}$ - число эффективных витков в одной параллельной фазной ветви; B_{δ} - индукция в воздушном зазоре; n - частота вращения; f - частота напряжения; Φ - магнитный поток; p - число пар полюсов; l - длина сердечника статора; α - коэффициент полюсного перекрытия; τ - полюсное деление; K_{Γ} - конструктивная постоянная генератора.

При малых скоростях ветряная турбина должна работать на малых частотах вращения, поэтому для поддержания напряжения нужно повысить индукцию в воздушном зазоре. При увеличении скорости ветра для поддержания напряжения при кубическом увеличении мощности приходится компенсировать реакцию якоря путем увеличения индукции. Диапазон регулирования индукции

ограничен магнитными свойствами электротехнической стали статора и полюсов и может колеблется в диапазоне $\pm 50\%$ от номинального значения. Исследуемый генератор работает следующим образом: на малых скоростях ветра выпрямительные блоки подключаются последовательно, что равносильно увеличению $W_{\phi l}$, по мере роста скорости ветра можно переключать выпрямительные модули параллельно или частично последовательно и частично параллельно. Параллельное переключение необходимо для снижения размагничивающего влияния реакции якоря на высоких скоростях за счет снижения $W_{\phi l}$. В итоге при снижении частоты вращения последовательное подключение позволяет снизить необходимые для регулирования диапазон изменения индукции для поддержания напряжения. Эта концепция позволяет генератору поддерживать постоянное напряжение практически в любом диапазоне изменения частоты вращения, поддерживать КПД при существенном увеличении мощности.

На рисунке 2 приведена принципиальная электрическая схема испытательного стенда. Ветряная турбина моделируется двигателем ПЗ2М смешанного возбуждения мощностью $P_{dn}=2,2$ кВт (на схеме М), с номинальной частотой вращения $n_n=1500$ об/мин. Номинальный ток двигателя $I_{dn}=12,2$ А и номинальное напряжение $U_n=220$ В. В цепь якорной обмотки включено дополнительное сопротивление r_d . Дополнительное сопротивление снижает частоту вращения в два раза при номинальной нагрузке. Изменение напряжения якорной обмотки производится с помощью автотрансформатор АТ подключенному к выпрямителю ВБ1, таким образом моделируется работа ветряной турбины при изменении скорости ветра. Параллельная обмотка возбуждения ОВ1 питается через свой выпрямитель ВБ2.

Рис.2. - Принципиальная электрическая схема стенда

В исследовании используется автомобильный генератор Г286В с паспортными данными: расчетная мощность 600 Вт, номинальное напряжение 14 В, максимальная мощность 1100 Вт, номинальный ток 80 А, заданный ток 13 А, заданное напряжение 13 В, частота вращения при заданной точке нагрузки и напряжения 1250 об/мин. В генераторе произведена перемотка обмотки якоря В1 и В2, обмотка возбуждения ОВ2 осталась без изменений. Она питается через выпрямитель ВБ3 трансформатор Т. Якорная обмотка перемотана на 24 В и 2 параллельные ветви. Каждая параллельная ветвь подключена к своему выпрямителю ВБ4 и ВБ5. За номинальную частоту вращения принята 1200 об/мин. Номинальная мощность принята 300 Вт. К выпрямительным модулям подключено нагрузочное сопротивление R1-R7. На рисунке 3 приведена фотография физической модели ветряной турбины.

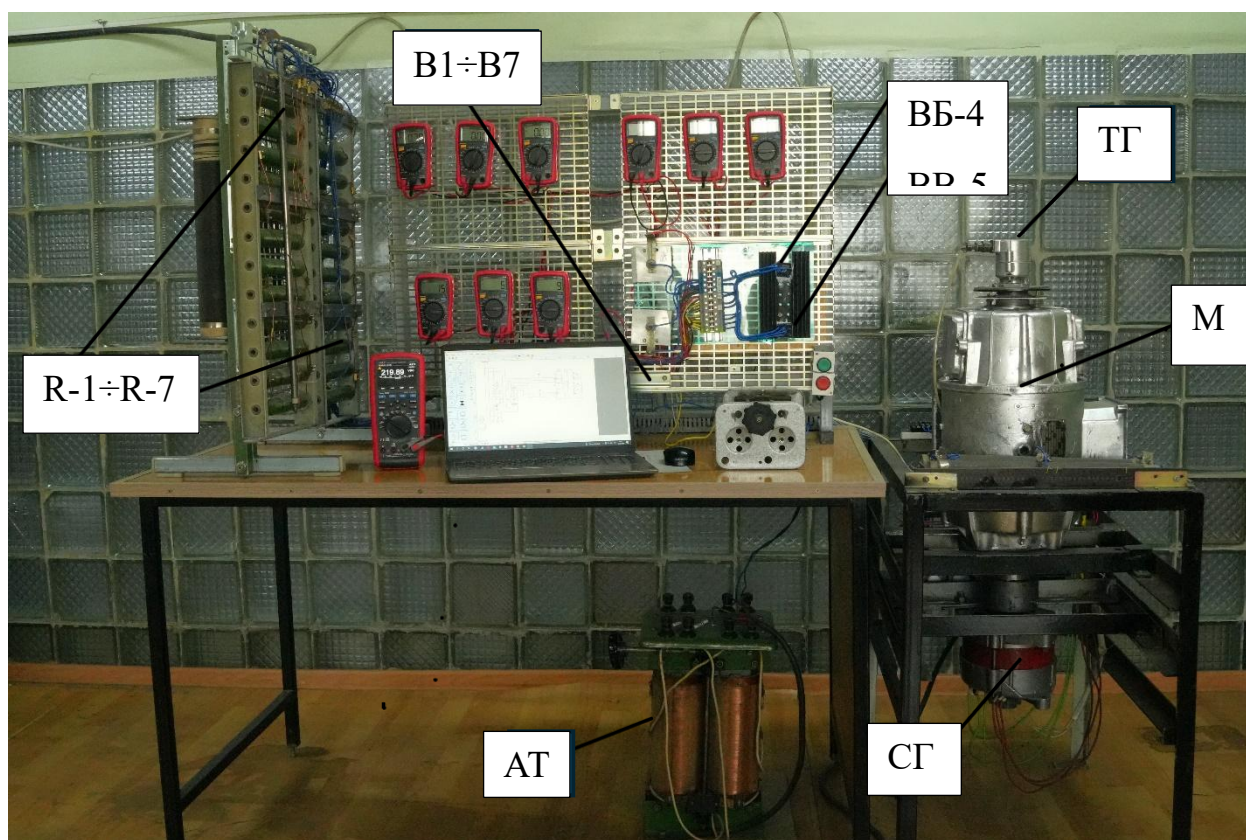


Рис. 3. - Физическая модель стенда ветряной турбины

Схема исполнения якорной обмотки приведена на рисунке 4. Сердечник статора состоял из $Z=18$ пазов, ротор состоит из 12 когтеобразных полюсов. Обмотку выполняли двухслойной. В одной катушке 75 витков, а в фазе 225 витков. Фазовые обмотки были соединены по схеме треугольник.

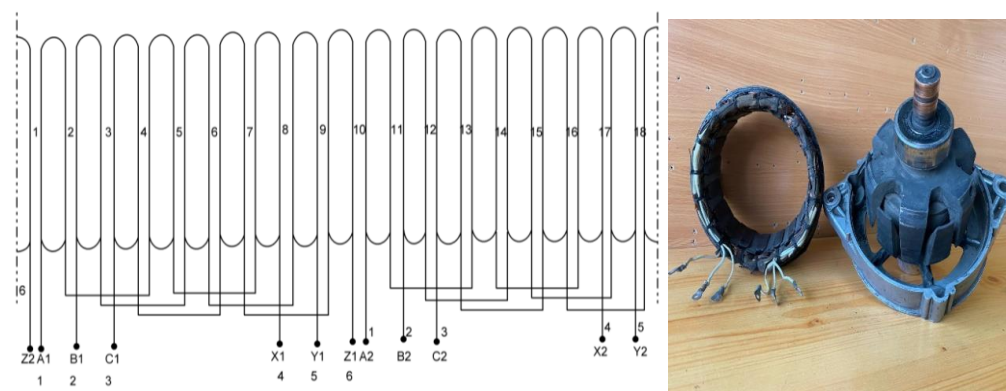


Рис.4. - Схема намотки якорной обмотки.

3. Результаты

3.1. Снятие характеристик холостого хода генератора

Для анализа свойств генератора достаточно получить следующие характеристики: характеристику холостого хода, внешнюю характеристику, регулировочную характеристику. Традиционная характеристика холостого хода отражает зависимость напряжения генератора от тока возбуждения при поддержании постоянной частоты вращения без подключения нагрузки генератора. В нашем исследовании проводится анализ совместимости характеристик генератора с ветряной турбины при широком диапазоне изменения скорости ветра. Поэтому в исследовании мы используем традиционную характеристику холостого хода на частотах вращения 1200 и 600 об/мин и «специальную» характеристику холостого хода при переменной частоте вращения. Специальная характеристика холостого хода отражает зависимость тока возбуждения от частоты вращения при поддержании постоянства напряжения. Эта характеристика дает возможность оценить диапазон изменения частоты вращения, в котором он поддерживает постоянство напряжения. На рисунке 5 приведена экспериментальная $U_d=f(I_{vg})$ и расчетная $U_{dras}=f(I_{vras})$ характеристика холостого хода на частоте вращения 1200 об/мин, выпрямительные поддулы подключены параллельно. Расчетная характеристика получена на математической модели ветряной турбины и генератора, написанной в среде Excel. Незначительные отклонения между экспериментальными и расчетными данными подтвердили адекватность математической модели. Результаты измерений в Таблице 2. Как видно из таблицы 2 результирующее напряжение на выводах генератора при параллельном подключении равно U_{dpar} , а при последовательном подключении равно сумме напряжений U_{dcon} . На рисунке 5 суммарное напряжение с последовательным и параллельным подключением выпрямительных модулей не показано. По результатам этого опыта следует, что схема с параллельно-последовательным переключением выпрямительных модулей работает. Количество выпрямительных модулей подбирается в зависимости от требуемого диапазона изменения рабочей частоты вращения.

На рисунке 6 изображены расчётные XX1, XX2 и экспериментальные XX1_{exp}, XX2_{exp} «специальные» характеристики холостого хода при изменении угловой скорости вращения от 42 до 135 рад/сек, что соответствует оптимальным угловым скоростям вращения, выбранной ветряной турбины на скоростях ветра от 7,3 до 22 м/с.

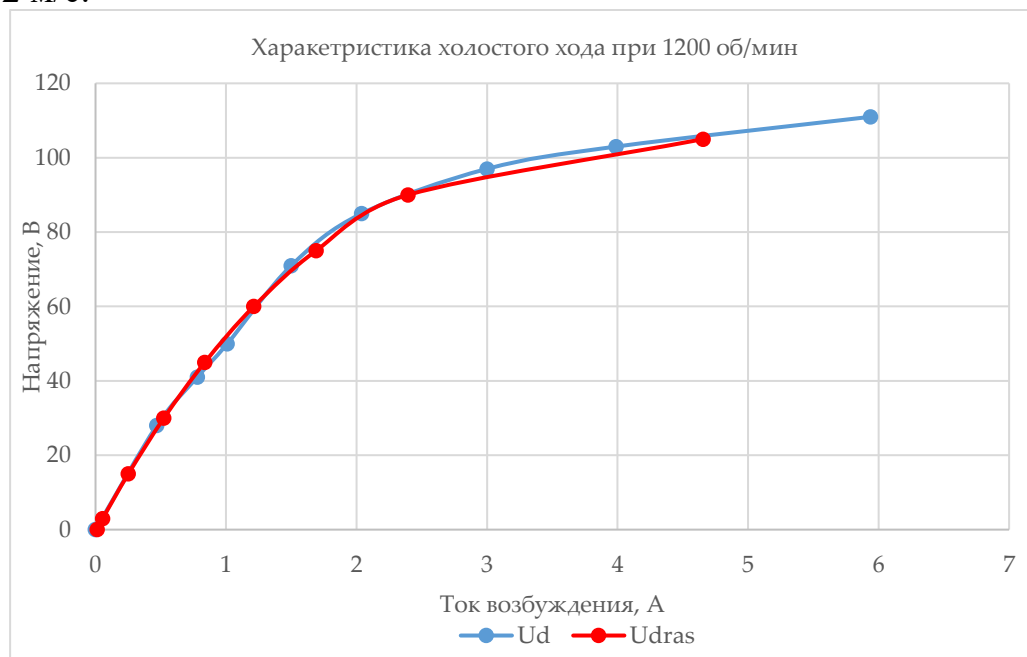


Рис.5. - Классическая характеристика холостого хода

Таблица 2. Характеристика холостого хода при частоте вращения 1200 об/мин.

Ivg, A	Ud1, V	Ud2, V	Udpar, V	Udcon, V	Ivras, A	Udras, V
0	0	0	0	0	0,0	0
0,47	28	28	28	56	0,1	3
0,78	41	41	41	82	0,3	15
1,01	50	50	50	100	0,5	30
1,50	71	71	71	144	0,8	45
2,04	85	85	85	170	1,2	60
3,00	97	97	97	194	1,7	75
3,99	103	103	103	203	2,4	90
5,91	111	111	111	222	4,7	105

В опытах снимались значения в четырех точках, поэтому в таблице заполнены четыре ячейки в строке *Ivexpl*. В модели не производился расчет для промежуточной скорости ветра 12,8 м/с, поэтому вместо расчетного значения тока в этой ячейке стоит прочерк. Согласно графику при снижении угловой скорости ниже 80 рад/сек наблюдается нелинейное увеличение тока возбуждения. Изменение угловой скорости в три раза привело к увеличению тока возбуждения в пять раз, что объясняется ростом насыщения магнитной цепи.

Характеристика XX2 соответствует характеристике холостого хода при последовательном включении выпрямительных модулей. Последовательное подключение суммирует напряжение двух выпрямительных модулей, соответственно для поддержания номинального напряжения генератора достаточно на каждом выпрямительном модуле поддерживать меньшее в два раза напряжение, что снижает требуемый ток возбуждения. Когда из-за высокого значения тока возбуждения насыщается магнитная цепь, достаточно переключить выпрямительные модули последовательно. Графики на рисунке 6 и таблицы 2 показывают удовлетворительную сходимость расчетных данных с экспериментальными.

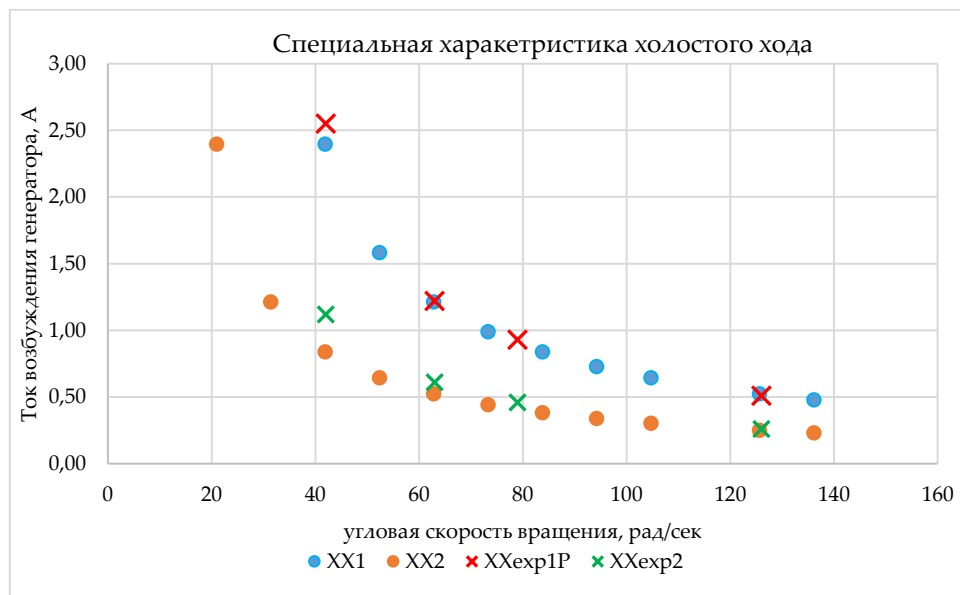


Рис. 6. - Специальная характеристика холостого

Таблица 3. Специальная характеристика холостого хода.

V_{wind} , m/sec	3,7	5,5	7,3	9,2	11	12,8	13,7	14,7	16,5	18,3	22
n_{opt} , rot/sec	200	300	400	500	600	700	750	800	900	1000	1200
ω_{opt} , rad/sec	21	31	42	52	63	73	79	84	94	105	126
U_g , V	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
I_{vexp} , A	-	-	2,55	-	1,22	-	0,93	-	-	-	0,51
I_{vr1} , A	-	-	2,39	1,58	1,21	0,99	-	0,84	0,73	0,64	0,52
I_{vr2} , A	2,4	1,21	0,84	0,64	0,52	0,44	-	0,38	0,34	0,3	0,25

3.2 Снятие внешних характеристик

Внешние характеристики отражают зависимость напряжения генератора при постоянной частоте вращения и токе возбуждения, и изменении нагрузки. На рисунке 7 приведена внешняя характеристика генератора для угловой

скорости в 63 рад/сек, току возбуждения 0,47 А, включению выпрямительных модулей параллельно и последовательно.

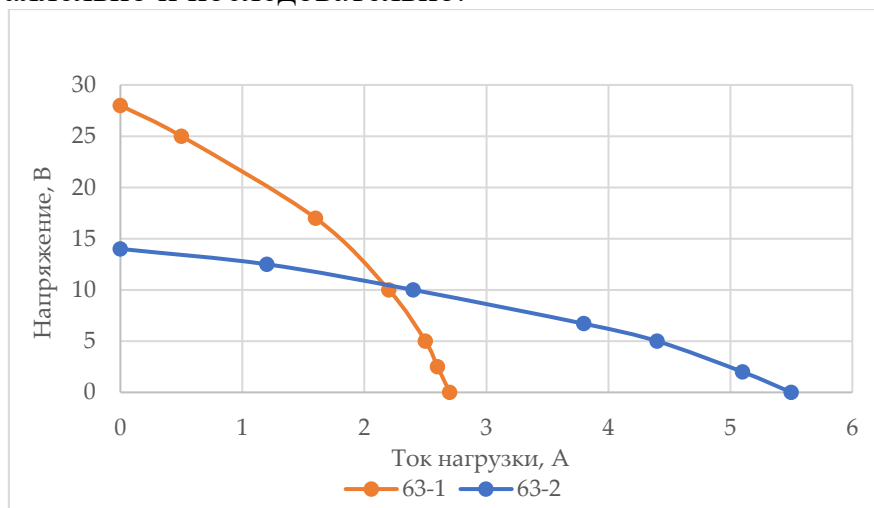


Рис.7. - Внешняя характеристика

Кривая 63-1 соответствует последовательному включению, а кривая 63-2 параллельному включению выпрямительных модулей. Наблюдаем увеличение напряжения при последовательном включении и снижение тока короткого замыкания. В таблице 3 представлены результаты снятия внешней характеристики.

Таблица 4. Внешняя характеристика при $\omega_{iopt} = 600$ рад/сек, $I_v = 0,47$ А.

Ig1, А	0	0,5	1,6	2,2	2,5	2,6	2,7
Ud1, V	28	25	17	10	5	2,5	0
Ig2, А	0	1,2	2,4	3,8	4,4	5,1	5,5
Ud2, V	14	12,5	17	10	5	2,5	0

3.3 Специальная регулировочная характеристика

Традиционная регулировочная характеристика отражает зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при поддержании постоянной величины напряжения и постоянной угловой скорости. Такая характеристика производит оценку соответствия генератора расчетным режимам. По ней нельзя оценить согласованности характеристик генератора с характеристикой ветряной турбины. Авторами предлагается другой подход к снятию регулировочной характеристики. Условно ее назвали «специальная» регулировочная характеристика. Под этим термином подразумевается регулировочная характеристика, отражающая зависимость тока возбуждения от угловой скорости вращения и мощности при поддержании постоянного напряжения. Она совмещает в себе частные случаи регулировочных характеристик генератора, но по одной точке на каждой угловой скорости. Величина тока нагрузки соответствует оптимальному току при данной угловой скорости. При построении этой характеристики подразумевается, что расчетные угловые

скорости вращения ω_{iopt} соответствующие мощности P_{wtiopt} выбираются согласно пунктирной кривой на рисунке 7. Результаты расчетов приведены Таблице 4. Она дает возможность по диапазону изменения тока возбуждения оценить возможность оценки оптимального режима при всех заданных скоростях ветра. Совмещение с зависимостью кпд при заданных режимах можно оценить эффективность генератора.

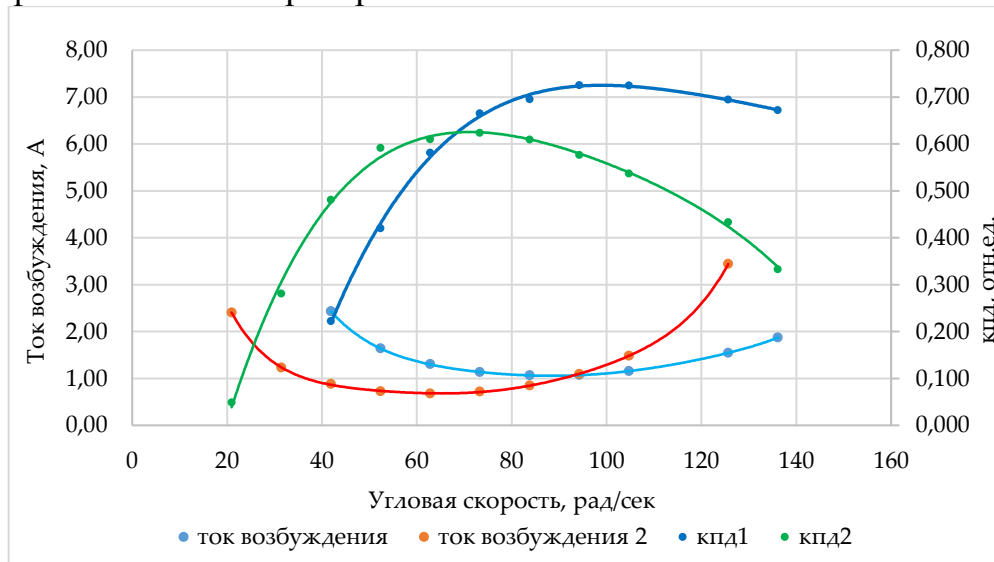


Рис. 7. - «Специальная» регулировочная характеристика

На графиках изображены зависимости тока возбуждения **Iv2** с параллельным включением и **Iv1** с последовательным включением выпрямительных модулей от изменения угловой скорости вращения ω_{iopt} . В модели под оптимальной угловой скоростью подразумевается, что мощность генератора P_{wtiopt} оптимальная для данной скорости ветра. На графике значения мощности не приведены. Полные значения всех показателей приведены в таблице 5. Кривая **Iv2** при снижении угловой скорости ниже 60 рад/сек (скорости ветра 11 м/с) начинает нелинейно расти, что объясняется нелинейной характеристикой магнитной цепи генератора. Коэффициент полезного действия принимает значения ниже 50 %, что неприемлемо. Переключение на последовательное включение выпрямительных модулей дает возможность поддерживать постоянное напряжение и удовлетворительное кпд при более широком диапазоне изменения угловой скорости. Однако из-за низкого расчетного кпд автомобильного генератора, малой мощности генератора и высокой расчетной угловой скорости в 126 рад/сек потери, несмотря на снижение, стали соизмеримы с полезной мощностью.

4. Заключение

Испытания опытного образца генератора на физической модели показали, достаточную точность расчета режимов на математической модели с результатами испытаний характеристики холостого хода, внешние характеристики. В дальнейшем анализе нас интересует диапазон изменения

оптимальной угловой скорости, при которой сохраняется удовлетворительный КПД генератора выше 50 % и токи возбуждения ниже 5 ампер. В исследовании используется заводская обмотка возбуждения, которая имеет ограничения по максимальной величине тока 5 Ампер. Поэтому нет возможности обеспечить оптимальный режим, если требуемый ток возбуждения превышает максимально допустимую величину. На совмещенных регулировочных характеристиках с зависимостями КПД можно оценить о диапазон угловых скоростей, на котором поддерживается оптимальный режим ветряной турбины. В итоге с двумя параллельными ветвями якорной обмотки мы имеем два генератора с разными параметрами и рассчитанными на разные режимы. В известных решениях с генераторами с несколькими обмотками [] каждая обмотка рассчитана на определенный режим и ее оптимальная нагрузка обеспечивается в определенном диапазоне изменения угловой скорости. Остальные обмотки находятся в режиме холостого хода или частичной нагрузки. Они загружаются не равномерно. Откуда следует, что такие решения требуют увеличения массогабаритных показателей. В предложенном варианте с многоуровневым выпрямителем все обмотки работают одновременно, и нагрузка идет одинаковая.

Параллельное переключение вентильных модулей снижает сопротивление якорной обмотки, что снижает потери в ней при увеличении мощности. Таким образом ток генератора распределяется между параллельными ветвями, сопротивление изменяется квадрату количества ветвей. Например, у нас генератор с четырьмя параллельными ветвями. На низких скоростях генератор включил все ветви последовательно, то активное сопротивление якорной обмотки максимально, а ток минимальный. На средних скоростях переключаем две ветви последовательно, полученные пары параллельно. Сопротивление обмотки уменьшится в четыре раза, а ток перейдет на средние тока. На высокой скорости ветра все четыре ветви включают параллельно, что снизит сопротивление обмотки в 16 раз по отношению к первой ступени, а токи увеличатся до максимальных значений. С точки зрения поддержания напряжения переключение выпрямительных блоков с параллельного на последовательное равносильно пропорциональному увеличению витков в якорной обмотке на малых скоростях ветра. На высоких скоростях ветра частота вращения высокая и для поддержания напряжения достаточно меньшее количество витков в якорной обмотке. Выбранная концепция многоуровневого выпрямителя адаптирует генератора под изменения скорости ветра и мощности. Поэтому массогабаритные размеры не увеличиваются.

Список литературы

1. Концепция развития сельских территорий Республики Казахстан на 2023 – 2027 годы. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2300000270>
2. Количество действующих крестьянских или фермерских хозяйств в РК выросло на 8,7%. <https://bizmedia.kz/2023-01-19-kolichestvo-dejstvuyushhih-krestyanskih-ili-fermerskih-hozyajstv-v-rk-vyroslo-na-87>

3. Анализ ветровых ресурсов и оценка выработки энергии для Казахстана. <https://rfc.kz/ru/res-sector/investors/renewable-resources/162707/>.
4. Shigemitsu T., Fukutomi J., Toyohara Y. Performance and Flow Condition of Cross-Flow Wind Turbine with a Symmetrical Casing Having Side Boards. International Journal of Fluid Machinery and Systems. Vol. 9, No. 2, April-June 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5293/IJFMS.2016.9.2.169>. (169-174 стр.).
5. Shigemitsu T., Fukutomi J., Takeyamas Y. Study on Performance Improvement of Cross-Flow Wind Turbine with Symmetrical Casing. Vol. 4, No. 3, 2009. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jee/4/3/4_3_490/_pdf/-char/en. DOI: 10.1299/jee.4.490. (490-501 cnh.).
6. Болотов А.В. Энергия великой степи-энергия для всех. Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. 2016. № 2 (60). https://journal.neark.kz/wp-content/uploads/2020/06/vestnik-2_2016.pdf.
7. Болотов А.В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Алматинский университет энергетики и связи. https://libr.aues.kz/facultet/eef/kaf_epp/43/umm/epp_1.htm. 79 стр.
8. Wibowoa A., Danardono D., Tjahjana D.P., Santosoc B., Risky M., Situmorangd C. Study of Turbine and Guide Vanes Integration to Enhance the Performance of Cross flow Vertical Axis Wind Turbine. AIP Conference Proceedings 1931, 030043 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5024102>. 8 стр.
9. Kurniawati D.M., Danardono D., Tjahjana D.P., Santosoc B. Experimental investigation on performance of crossflow wind turbine as effect of blades number. <https://doi.org/10.1063/1.5024104>. (8 стр.)
10. Tareq A. Ismaeel, Sattar Aljabair, Omar A. Abdulrazzaq, Yasir A. Abood. Energy Recovery of Moving Vehicles' Wakes in Highways by Vertical Axis Wind Turbines. https://www.mas.bg.ac.rs/_media/istrazivanje/fme/vol48/3/9_s_aljabair_et_al.pdf.
11. Болотов А. В., Болотов С. А., Болотов Н. С. Ветроэнергетический агрегат Болотова. 2009-04-20 Publication of RU2352809C1. <https://patents.google.com/patent/RU2352809C1/ru>.
12. Gasch R., Twele J. Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation. Second Edition. DOI 10.1007/978-3-642-22938-1. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012.
13. M. A. Hannan, Ali Q. Al-Shetwi, M. S. Mollik, Pin Jern Ker, M. Mannan, M. Mansor, Hussein M. K. Al-Masri, T. M. Indra Mahlia. Review: Wind Energy Conversions, Controls, and Applications: A Review for Sustainable Technologies and Directions. Sustainability 2023, 15, 3986. <https://doi.org/10.3390/su15053986>.
14. M. Godoy Simoes, Felix A. Farret. Alternative energy systems: Design and Analysis with Induction Generators. Second edition. CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742. (452 стр.)
15. Osuji Christopher Uche & Onwughalu Mark Anthony Kenechi. Renewable Energy Solution of Wind Turbine Using Doubly-Fed Induction Generator for Energy Efficiency and Reliability. International Journal of Advanced Studies in Engineering

and Scientific Inventions. Volume 5, Number1 June, 2024. DOI: 10.48028/iiprds/ijasesi.v5.i1.13.

16. Ashraf K., Abdelaal, Mohamed A., El-Hameed. Strengthening Low-Voltage Ride Through Competency of Doubly Fed Induction Generator Driven by Wind Turbine Using Super-Twisting Sliding Mode Control. *Energies* 2025, 18, 1954.

17. Бакенов К.А. Электромеханический преобразователь для ветроэлектроустановки. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. АУЭС. Алматы. 2010 г. 139 стр.

18. T.N. Agimov, E. K. Umbetkulov, K.A. Bakenov, A. I. Nekrasov, B. Ongar. Development of a valve generator with a variable frequency of rotation. *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences.* Volume 3, Number 435 (2019), 193 – 201 ps. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.86>.

ӘОЖ 620.92

ТОМЕН ЖЕЛДІ АЙМАҚТАР ҮШІН МОДУЛЬДІ КҮН–ЖЕЛ ГИБРИДТІ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ІСКЕ АСЫРЫЛУЫН ЗЕРТТЕУ

Алдиарбек Н.Е.¹, Онгар Б.¹, Нигматуллин Р.М.², Сарсенбаев Е.А.¹

¹ Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті.

² Ғ.Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан

*e-mail: 981211400564-d@stud.satbayev.university

Кіріспе

Қазақстанда жаңартылатын энергия көздерін дамыту – стратегиялық деңгейдегі міндет. 2023 жылғы мәліметтер бойынша елдің энергия теңгеріміндегі ЖЭК үлесі шамамен 4%-ды құрады. 2030 жылға қарай бұл көрсеткішті 15%-ға, ал 2050 жылға дейін 50%-ға жеткізу жоспарланған [1]. Мұндай мақсаттарға жету үшін техникалық әрі экономикалық тұрғыдан тиімді жаңа шешімдер қажет.

Қазақстан күн радиациясы бойынша жоғары әлеуетке ие елдердің қатарына жатады. Дүниежүзілік банк пен Global Solar Atlas деректері бойынша оңтүстік өңірлерде жылдық орташа күн радиациясы 1500–1700 кВт·сағ/м² құрайды [2]. Дегенмен, жел ресурстары біркелкі емес: далалық аймақтарда салыстырмалы түрде тұрақты болғанымен, оңтүстікте орташа жылдамдығы 2,5–3,5 м/с деңгейінде ғана [3]. Бұл дәстүрлі жел қондырғылары үшін жеткіліксіз көрсеткіш болып саналады.

Халықаралық тәжірибе төмен желді аймақтарда күн мен желді біріктірген гибриді жүйелердің тиімділігін дәлелдеп отыр. Мәселен, Үндістанда ауыл шаруашылығында суару жүйелеріне арналған күн–жел қондырғылары оң

нәтижелер көрсетсе [4], Тунисте АНР+GIS әдістерін қолдану арқылы қолайлы орын таңдау жүргізілген [5]. Канадада жүргізілген технико-экономикалық талдау гибридті жүйелердің шығындарды азайтып, CO₂ шығарындыларын төмендететінін көрсетті [6]. Дегенмен, төмен желді аймақтарға арналған кешенді әдістемелік зерттеулер жеткіліксіз.

Алғашқы кезеңде бұл зерттеу жұмысына төрт бағыт ұсынылды:

- жаңартылатын энергияны болжау және оңтайландыру;
- басқару, синхронизация және гармоникалық бұрмалануларды талдау;
- технико-экономикалық бағалау (HOMER Pro, CO₂ шығарындыларын есептеу);
- төмен желді аймақтардағы күн–жел гибридті жүйелерінің іске асырылу негіздемесі (feasibility framework).

Алғашқы үш бағытта айтарлықтай зерттеулер бар екендігі анықталды, ал төртінші бағыт жеткілікті деңгейде қарастырылмаған. Әсіресе төмен желді аймақтарға арналған кешенді әдістер мен тәжірибелік жұмыстардың жетіспеуі – әлі жеткілікті қарастырылмаған мәселе болып табылады.

Жұмыстың мақсаты төмен желді аймақтарға арналған күн–жел гибридті жүйелерінің іске асырылуын бағалау және қолданыстағы зерттеулер негізінде research gap анықтау.

Зерттеу әдістері

Бұл зерттеу әдеби шолу және салыстырмалы талдау әдістеріне негізделді. 2020–2025 жылдар аралығында жарияланған күн–жел гибридті жүйелеріне арналған ғылыми мақалалар қарастырылды. Іріктеу кезінде мынадай критерийлер ескерілді:

- күн–жел жүйелерінің техникалық және экономикалық тиімділігі;
- төмен желді аймақтарға қатысты деректердің болуы;
- нақты көрсеткіштердің (LCOE, NPC, энергия өндірісі) берілуі.

Әдебиеттерді талдау барысында әртүрлі елдерде жүргізілген зерттеулердегі әдістер, қолданылған бағдарламалық құралдар (HOMER Pro, MATLAB, GIS, RETScreen), көрсеткіштер мен нәтижелер салыстырылды.

Нәтижелер мен талқылау

Соңғы жылдары жүргізілген зерттеулер күн-жел гибридті жүйелерінің әртүрлі қолдану салаларындағы техникалық-экономикалық артықшылықтарын көрсетеді. Әдебиеттер негізінде жиналған деректерді салыстыру үшін төменде гибридті жүйелердің қолданылуын бағалау нәтижелері кесте түрінде берілді (Кесте 1).

1-кесте. - Гибридті күн-жел жүйелерін бағалауға арналған зерттеу нәтижелерінің салыстырмасы

Авторлар	Аймақ / нысана	Әдіс / құралдар	Негізгі нәтижелер	Шектеулер
Su et al., 2023 [7]	Қытай, жасыл сутек	Машиналық оқыту әдістері мен HOMER бағдарламасы	Жүйе сенімділігі артты, сутек өндіру әлеуеті дәлелденді	Модельдік талдау деңгейінде, саяси тосқауылдар ескерілмеген
Sulley et al., 2022 [8]	Африка	PV, WT және BESS конфигурациясына техничко-экономика- лық бағалау	Маусымдық ауытқулар азайды, экономикалық тиімділігі дәлелденді	Төмен желді аймақтар бойынша нақты деректер берілмеген
Rekik & Alimi, 2023 [5]	Тунис	АНР және GIS әдістері арқылы орын тандау	Географиялық факторларды ескерудің маңыздылығы көрсетілді	Low-wind контекстінде толық қолданылмаған
Grant et al., 2024 [9]	АҚШ, сутек өндірісі	Модельдеу және экономикалық талдау	Гибридті жүйелердің тиімділігі және CO ₂ шығарындылары азаюы дәлелденді	Нақты далалық сынақтар жоқ
R et al., 2025 [4]	Үндістан, ауыл шаруа- шылығы	HOMER Pro, NPC талдау	Жылдық энергия 7 521 кВт·сағ, артық 2 629 кВт·сағ сату мүмкіндігі бар	Симуляция деңгейінде қалды
Wang, 2020 [10]	Қытай, үй шаруашылығы	Конфигурация талдау, LCOE есебі	Энергия құны төмендеді, шағын жүйелерге тиімді	Аймақтық бейімделу қажет
Farhadi & Iqbal, 2024 [6]	Канада, Postville	Techno-economic талдау	CAPEX және OPEX төмендеді, CO ₂ шығарындылары азайды	Аймаққа тәуелді
Hassan, 2023 [11]	Жалпы шолу	Саясат пен AI талдау	Интермиттенси төмендеді, AI негізінде оптимизация мүмкіндігі анықталды	Мемлекеттік қолдау жетіспейді
Gonzalez, 2024 [12]	Дамушы елдер	Off-grid, әдеби шолу	CO ₂ төмендеп, халықтың тұрмыс сапасы жақсарды	Нақты далалық зерттеулер жоқ
Ahmadi, 2023 [13]	Вьетнам, Con Dao аралы	Multi-approach framework	Экономикалық тиімділік пен экологиялық пайда дәлелденді	Артық энергия шамадан тыс
Mas'ud, 2025 [14]	Сауд Арабия	Weibull функциясы, cuckoo search алгоритмі	LCOE=0.148\$/кВт·сағ, сенімділік жоғары	Әр аймаққа бейімделген, жалпылау қиын
Al Afif, 2023 [15]	Иордания	HOMER Pro	PV+WT+BESS ең тиімді, CO ₂ шығарындылары 53% азайды	Бір аймақтың мысалымен шектелген

Талқылау:

Жалпы алғанда, күн–жел гибриді жүйелері сенімділік пен тұрақтылықты арттыруда тиімді шешім болып отыр. PV+WT+BESS комбинациясы жиі кездесіп, LCOE төмендету және CO₂ азайту бойынша оң нәтижелер көрсетеді. Дегенмен,

көп зерттеулер модельдеу деңгейінде қалып қойған, ал төмен желді аймақтарға бейімделген нақты далалық зерттеулер аз.

Қорытынды

Әдеби шолу нәтижелері күн–жел гибриді жүйелерінің төмен желді аймақтарда қолдану әлеуетін растады.

Мұндай жүйелер электрмен қамтудың сенімділігін арттырады және CO₂ шығарындыларын азайтады. Экономикалық көрсеткіштер (LCOE, NPC) олардың тиімділігін дәлелдейді. Бірақ, төмен желді аймақтар үшін кешенді тәжірибелік зерттеулер жеткіліксіз.

Болашақта Қазақстан жағдайына бейімделген модельдеу және пилоттық жобалар жүргізу қажет.

Әдебиеттер тізімі

1. Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan. (2023). *Energy Balance of Kazakhstan 2023*. Retrieved from <http://www.gov.kz>
2. Global Solar Atlas. (2023). *Solar resource data for Kazakhstan*. World Bank, ESMA, Solargis. <https://globalsolaratlas.info>
3. NASA POWER Data Access Viewer. (2023). NASA Langley Research Center. <https://power.larc.nasa.gov>
4. R, S. L. S., Herbert, G. M. J., & Vijayan, A. (2025). Feasibility analysis of solar and wind energy-powered irrigation pumping systems using reanalysis data – A case of Thiruvananthapuram district in Kerala, southwest region of India. *Wind Engineering*, 49(3), 632–645. <https://doi.org/10.1177/0309524x241313190>
5. Rekik, S., & Alimi, S. E. (2023). Unlocking renewable energy potential: A case study of solar and wind site selection in the Kasserine region, central-western Tunisia. *Energy Science & Engineering*, 12(3), 771–792. <https://doi.org/10.1002/ese3.1650>
6. Farhadi, A., & Iqbal, M. T. (2024). Optimal sizing and techno-economic analysis of a hybrid power system for Postville. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 9(2), 5–12. <https://doi.org/10.24018/ejeng.2024.9.2.3127>
7. Su, W., Zheng, W., Li, Q., Yu, Z., Han, Y., & Zhang, B. (2023). Capacity configuration optimization for green hydrogen generation driven by solar-wind hybrid power based on comprehensive performance criteria. *Frontiers in Energy Research*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1256463>
8. Sulley, M., Acakpovi, A., Adjei, P., Sackey, D. M., Offei, F., Afonope, M., ... & Tay, G. (2022). Techno-economic assessment of grid connected solar PV/wind hybrid system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1042(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1042/1/012016>
9. Grant, E. J., Brunik, K., King, J. S., & Clark, C. E. (2024). Hybrid power plant design for low-carbon hydrogen in the United States. *Journal of Physics: Conference Series*, 2767(8), 082019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2767/8/082019>

10. Wang, M. (2020). Capacity optimization and configuration for household wind/PV/storage hybrid power generation system. *Progress in Energy & Fuels*, 9(1), 10. <https://doi.org/10.18282/pef.v9i1.848>
11. Hassan, Q., et al. (2023). A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions – Challenges, opportunities, and policy implications. *Results in Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101234>
12. Gonzalez, M. C. (2024). Assessment of hybrid renewable energy systems for off-grid applications: A review of power generation technologies and potential in developing regions. *International Journal of Research and Engineering*. <https://doi.org/10.31227/osf.io/xyz12>
13. Ahmadi, M. M., et al. (2023). A multi-approach framework for developing feasible, viable, and sustainable hybrid energy systems in remote areas: The case of Con Dao island in Vietnam. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137621>
14. Mas'ud, A., et al. (2025). Wind energy assessment and hybrid micro-grid optimization for selected regions of Saudi Arabia. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90123-4>
15. Al Afif, R., et al. (2023). Feasibility and optimal sizing analysis of hybrid renewable energy systems: A case study of Al-Karak, Jordan. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.116789>

ӘОЖ 538.94

ЕКІӨЛШЕМДІ МАТЕРИАЛДАРДЫ МОДЕЛДЕУДІҢ НЕГІЗДЕРІ: ТЕОРИЯДАН ПРАКТИКАҒА

Байкадамова Л.С.¹, Қаптағай Г.Ә.^{1*}, Қойлық Н.О.²

¹ ҚазҰлтҚызПУ, Алматы, Қазақстан

² Абай атындағы ҚазҰлтПУ, Алматы, Қазақстан

e-mail: qaptagay.g@qyzpu.edu.kz

Графен негізіндегі гетерокұрылымдар және нанокұрылымды, өтпелі металдардың ферромагниттік оксидтерінен жасалған екі өлшемді пленкалар жад жасушаларына, кванттық компьютер элементтеріне, литий-ионды аккумулятор анодтарына, (фото) катализаторларға, суперконденсаторларға, транзисторларға, сенсорлық материалдарға, күн панельдеріне, отын элементтеріне, электрохромдық құрылғыларға арналған жаңа мультифункционалды материалдарды әзірлеуге перспективалы. Көптеген басылымдар графен мен оның негізіндегі гетерокұрылымдарға және негізінен гибриді құрылымдарды синтездеу процестеріне арналған. Екі өлшемді пленка материалдарының оптикалық қасиеттерін теориялық зерттеу әдістері, олардың әртүрлілігіне

қарамастан, жетілдіруді қажет етеді. Демек, мақалада *ab-initio* әдісімен біріктірілген екі өлшемді гибриді пленка құрылымдарының оптикалық қасиеттерін теориялық зерттеу әдістері келтірілген.

Қалыңдығы бір атом көміртегі қабатынан түзілген көміртектің екі өлшемді аллотропты модификациясы болып табылатын жартылай металл графеннің ашылуы екі өлшемді пленка материалдарын (2DLM) әзірлеудің қуатты теориялық және эксперименттік алғышарттарын жасады. Әрбір пленкада құрылымның тұрақты конфигурациясын қамтамасыз ететін коваленттік байланысы бар ұяшық бар. Ақ графен деп аталатын алтыбұрышты BN (бор нитриді) ұқсас геометриялық құрылымы бар графеннің жақын аналогы болып табылады, оның қарабайыр жасушасында әрбір көміртек атомы бор мен азотқа ауыстырылады. Алтыбұрышты BN кең жолақты окшаулағыш бола отырып, жұқа туннельдік тосқауылдар [1,2], тығыздағыш материалдар [3] және бұзбайтын диэлектриктер [4] ретінде қолданылады. Қазіргі уақытта көміртегі, азот және Бор комбинациясын пайдалана отырып, реттелетін электрондық қасиеттері бар пленкаларды синтездеу бойынша эксперименттік жұмыстар жүргізілуде.

Екі өлшемді материалдардың тағы бір тобы - өтпелі металл дихалькогенидтерінде электрондық қасиеттері бар әртүрлі пленка материалдары бар. Ол әдетте AB_2 деп белгіленеді, мұнда металл негізінен молибден немесе вольфрам, Ал В-табиғи кендерден қабыршақтанатын немесе химиялық булардың тұндыруымен синтезделетін халькогенид (күкірт, селен немесе теллурий). Молибден мен вольфраммен қатар цирконий, рутений, тантал, титан, ниобий және никельмен тұрақты қосылыстар қолданылады. Көптеген қосылыстардың ішінде жақсы зерттелген MoS_2 , $MoSe_2$, WS_2 және WSe_2 қосылыстар бөлме температурасында тасымалдаушының қозғалғыштығы $100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ болатын ~ 1 - 2 эВ конфигурацияланатын жолақ аймағы бар [5].

Қара фосфорлар немесе фосфорендер (моноқабықша түрінде) жоғары анизотропты қасиеттерге ие және $0,33$ эВ-тан $1,5$ эВ-қа дейінгі басқарылатын жолақ саңылауына ие, тасымалдаушының бөлме температурасындағы қозғалғыштығы $1,00 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [6].

Екі өлшемді өтпелі металл оксиді пленкалары (ӨМО) қазіргі уақытта жартылай өткізгіштерден, металдардан асқын өткізгіштерге дейінгі материалдық қасиеттерінің кең ауқымына байланысты іргелі зерттеулерде де, технологиялық қолданбаларда да маңызды болып табылады. Дегенмен, орныққан қасиеттері бар материал әмбебап қолданысқа ие болмауы мүмкін. Бірегей кристалдық құрылымдарға, физикалық және химиялық қасиеттерге байланысты 2D ӨМО өлшемін азайту, интеркаляция, гетероқұрылым, допинг және қақпалау сияқты әртүрлі стратегияларды қолдану арқылы тиімді конфигурациялануы мүмкін. Екі немесе одан да көп атомдық жұқа графен тәрізді материалдардың қосындысынан жасалған құрылымдар бастапқы құрылымдардың қасиеттерін өзгертеді, ал жаңа гибриді қасиеттері бар материал пайда болады, бұл жаңа материалдар мен нанокұрылымдарды жасау үшін жаңа парадигмаларды ашады. Күшті коваленттік байланыстар 2D кристалдарының жазықтық тұрақтылығын қамтамасыз етеді, ал

эртүрлі қабаттар арасындағы байланыс Ван-дер-Ваальстың өзара әсерлесуімен қамтамасыз етіледі. Демек, мұндай гетероқұрылымдар Ван-дер-Ваальс гетероқұрылымдары деп аталады.

Графен негізіндегі гетероқұрылымдар және наноқұрылымды өтпелі металл оксидтерінің екі өлшемді қабықшалары жад ұяшықтары, кванттық компьютерлер, литий батареяларының анодтары, (фото)катализаторлар, суперконденсаторлар, транзисторлар үшін жаңа көп функциялы материалдарды әзірлеу үшін перспективалы болып табылады., сенсорлық материалдар, күн батареялары, отын элементтері, электрохромды құрылғылар. Оның негізінде графен мен гетероқұрылымдарға арналған жарияланымдардың үлкен көлемі іс жүзінде гибриді құрылымдардың синтез процестерінің ерекшеліктерін зерттеуге арналған. Графен мен екі өлшемді наноқұрылымды өтпелі металл оксидтерінің үйлесуі наноөлшемді диапазондағы көпфункционалды материалдардың жаңа негізін құра отырып, құрылымдық элементтердің интерфейсындағы түбегейлі жаңа және белгісіз процестерге, заңдылықтарға әкеледі.

VdW эксперименттік зерттеу әдістерінің теориясына қысқаша шолу

Екі өлшемді Ван-дер-Ваальс графен-ӨМО материалдары тұрақсыз ұжымдық күйлер тудыратын екі өлшемді қабаттарда көп электронды әсерге ие. Осыған байланысты төмен Кюри температурасында 2D жұмсақ ферромагниттерде спиндердің ферромагниттік реттілігі байқалды. Тұрақты ұжымдық күйлерді қосу осы материалдардың технологиялық қолданылуын кеңейтеді.

Эксперименттік түрде [7,8] өтпелі металл оксидтерінде құрылымның интерфейсында графенмен бірге жаңа және перспективалы магниттік, электронды және оптикалық қасиеттерді қалыптастыратыны анықталды. Төмен өлшемді құрылымдарда толқындық функциялардың локализация аймағы ондаған нанометрді құрайды, жолақаралық ауысулардың матрицалық элементтері құрылымның енімен бірдей өлшемге ие. Бұл өз кезегінде 3d құрылымдарына қарағанда мұндай құрылымдардағы оптикалық реакцияны күшейтеді. Жүйенің 2 элементі де бір атом болғандықтан, олардың беттік өткізгіштік тензоры ху жазықтықтарында былай сипатталған

$$\gamma = \begin{bmatrix} \gamma_{xx} & \gamma_{xy} \\ \gamma_{yx} & \gamma_{yy} \end{bmatrix}$$

Мұнда z осінің компоненттері жойылады, олар $\gamma_{zz} = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$. Магниттік-оптикалық эффектілерді ескере отырып [9-11], беттік өткізгіштік тензоры келесі түрде ұсынылған

$$\gamma = \begin{bmatrix} \gamma_L & \gamma_H \\ -\gamma_H & \gamma_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

мұнда бойлық өткізгіштік γ_L және γ_H Холл өткізгіштігі Кубо формализмімен анықталды [12]. Бөлме температурасында және орта инфрақызыл аймақта бойлық өткізгіштік пен Холл өткізгіштігі Друде моделімен байланысты [13] келесі өрнектер бойынша:

$$\gamma_L = \bar{\gamma} \frac{1 - iw\tau}{(w_c\tau)^2 + (1 - iw\tau)^2}, \quad (2)$$

$$\gamma_H = \bar{\gamma} \frac{w_c\tau}{(w_c\tau)^2 + (1 - iw\tau)^2}, \quad (3)$$

Мұндағы $\tau = \frac{1}{2\Gamma}$ - шашырау уақыты (Γ - плазмондар шамасы), $\omega_c \approx eB_z v_F^2 / \mu_c$ циклотрон жиілігі (электрон заряды e , B_z магнит өрісінің z осінің құраушысы), $v_F \approx 10^6$ м/с Ферми жылдамдығы,

$$\bar{\gamma} = \frac{2e^2 k_B T}{\pi \hbar} \ln \left[2 \cosh \left(\frac{\mu_c}{2k_B T} \right) \right]. \quad (4)$$

Орта инфрақызыл аймақтағы жиіліктер үшін негізгі [8] өрнек көлденең және Холл өткізгіштігі Друде моделі арқылы ықшамдалады. Магнетостатик ықшамдау жағдайы үшін ($B_z = 0$), көлденең өткізгіштік $\gamma_L = \gamma_{intra} = \gamma_{inter}$ себебі интрамүжілу (γ_{intra}) және интерполяциялық γ_{inter} үлес

$$\gamma_{intra}(w) = \frac{2e^2 k_B T}{\pi \hbar} \frac{\tau}{1 - iw\tau} \ln \left[2 \cosh \left(\frac{\mu_c}{2k_B T} \right) \right]. \quad (5)$$

Жолақаралық өткізгіштік тікелей жолақаралық электронды ауысулардан қалыптасады. Ол бөлме температурасында және орта инфрақызыл аймақтан төмен жиіліктерде ескерілмейді, өйткені ол жолақаралық үлестерден әлдеқайда аз. Ол интегралды түрде өрнектеледі:

$$\gamma_{inter}(w) = \frac{e^2}{4\hbar} \left[G \left(\frac{w}{2} + \frac{4iw}{\pi} \int_0^\infty \frac{G(s) - G(w/2)}{w^2 - 4s^2} ds \right) \right], \quad (6)$$

$$G(s) = \frac{\sinh[\hbar s / (k_B T)]}{\cosh[\mu_c / (k_B T)] + \cosh[\hbar s / (k_B T)]} \quad (7)$$

Оптикалық қасиеттер бойынша олар беттер ретінде қарастырылады. Электр өрісіне ұшыраған кезде сызықты емес оптикалық реакция көрінеді. Қатты денелер мен сұйықтардағы сызықтық емес оптикалық реакцияны алғаш рет Дж.Каром зерттеді.

Көптеген есептеу электромагниттік әдістерінде беттік шамалардың көлемдік эквиваленттерімен жұмыс істеу ыңғайлы. Іс жүзінде тиімді қалыңдығы

2DLM болатын беттік өткізгіштіктің орнына көлемдік өткізгіштік $\gamma_b = \gamma_L / h_{eff}$ қолданылады, мұндағы h_{eff} . Мұндай материалдардың электромагниттік қасиеттері диэлектрлік өткізгіштікпен де сипатталады, ол өткізгіштікке келесі өрнекпен байланысты:

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{i\gamma_h}{\varepsilon_0 \omega} = 1 + \frac{i\gamma_L}{\varepsilon_0 \omega h_{eff}} \quad (8)$$

$$\varepsilon_r = 1 + \sum_{k=1}^N \frac{f_k}{w_k^2 + i\omega\delta_k + (i\omega)^2}, \quad (9)$$

Ван-дер-Ваальс (vdW) гетероқұрылымдары екі өлшемді материалдардан және функционалды әртүрлі құрылымдардан (өтпелі металл оксидтері, органикалық молекулалар, қабатты металл оксидтері, қабатты қос гидроксидтер, қабатты металл халькогенидтері, қабатты металл карбидтері және т.б.) тұрады. Оптоэлектрлік қасиеттерін дамыту үшін қарқынды зерттелген [9]. Егер функционалдық құрылымдар тиісті түрде жобаланған болса, бұл материалдардың электрондық құрылымын және оптикалық қасиеттерін модификациялауға мүмкіндік береді [10]. Аралас өлшемді гетероқұрылымдардың тиімділігін анықтау үшін іргелі уақыт шкалаларында жартылай өткізгіш интерфейсіндегі зарядтар мен энергия алмасу процестерінің табиғатын түсіну маңызды. Үш түрлі vdW гетероқұрылымындағы фотофизикалық процестердің соңғы нәтижелері талқыланды: 1) конъюгацияланған полимер/MoS₂ органикалық/2D гетероқұрылымдары [11]; 2) полимер: плазмоникалық метабеттің қатысуымен фуллерен/MoS₂ органикалық/2D гетероқұрылымдары [12]; және 3) ReS₂/MoSe₂ ii типті 2D/2D гетероқұрылымдары [13-16]. Зерттелген органикалық/2D гетероқұрылымдарда зарядтың MoS₂-ден конъюгацияланған полимерлерге ультра жылдам ауысуы 9 пс шегінде, ал кейбір жағдайларда 120 пс-тен төмен болды. Плазмоникалық метабеттің қатысуымен ультра жылдам уақыт шкаласында зарядты генерациялау өнімділігі 6 еседен астам жақсарды. ReS₂ / MoSe₂ гетероқұрылымында біз резонанстық энергияның Берілуі ReS₂-Ден MoSe₂-ге зарядты тасымалдауда, тіпті зарядты блоктайтын аралық қабатсыз да басым болатынын көрсетеміз. қабатты бейорганикалық қатты денелердің (қабатты металл оксидтері, қабатты қос гидроксидтер, қабатты металл халькогенидтері, қабатты металл карбидтері және графен) анизотропты 2D наноқабаттары бар энергияны қолдану мақсаттары әртүрлі vdW гетероқұрылымдық гибридті материалдар, сондықтан олардың көп функциялы наногибридтері үшін ғылыми қызығушылық тудырады [17-20]. Бейорганикалық қатты денелердің бір қабатты 2D наноқабаттарын таза қабатты материалдардың жұмсақ химиялық қабыршақтану реакциясы арқылы синтездеуге болады. Бейорганикалық наноқабаттардың химиялық құрамдарының, кристалдық құрылымдарының және ақау құрылымдарының алуан түрлілігі материалдардың бұл класын физикалық қасиеттері мен функционалдық мүмкіндіктерінің кең ауқымымен қамтамасыз етеді.

Бейорганикалық нанопарақтарды интерфейс пен ақауларды жобалау арқылы өнімділігі жоғары гибридті электродтар мен катализаторларды зерттеу үшін қуатты құрылыс блоктары ретінде пайдалануға болады.

Әдебиеттер тізімі

1. Wang Q. H., Kalantar-Zadeh K., Kis A., Coleman J. N. & Strano M. S. Electronics and optoelectronics of twodimensional transition metal dichalcogenides // Nat. Nanotechnol. – 2012. Vol.7, - P. 699–712.
- 2 Geim A. K. & Grigorieva I. V. A comprehensive review of stacking 2DLMs into diverse vdWHs. Van der Waals heterostructures // Nature. – 2013. Vol. 499, - P. 419–425.
3. Andres, C.-G. et al. Deterministic transfer of twodimensional materials by all-dry viscoelastic stamping. 2D Mater. – 2014. Vol. 1, - P. 011002.
4. Halim U. et al. A rational design of cosolvent exfoliation of layered materials by directly probing liquid–solid interaction // Nat. Commun. – 2013. Vol. 4, - P. 2213.
5. Ye J. et al. Superconducting dome in a gate-tuned band insulator // Science. – 2012. Vol. 338, - P.1193–1196.
6. Feng Q. et al. Growth of $\text{MoS}_2(1-x)\text{Se}_{2x}$ ($x=0.41-1.00$) monolayer alloys with controlled morphology by physical vapor deposition // ACS Nano. – 2015. Vol. 9, - P.7450–7455.
7. Y. Cao. Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices // Nature. -2018.-Vol.556,-P. 43
8. Y. Cao. Correlated insulator behaviour at half-filling in magic-angle graphene superlattices // Nature. -2018.-Vol.556, - P.80.
9. C. E. Petoukhoff, S. Kosar, M. Goto, I. Bozkurt, M. Chhowalla, and K. M. Dani. Charge transfer dynamics in conjugated polymer/ MoS_2 organic/2D heterojunctions // Mol. Syst. Des. Eng. - 2019. –Vol. 4, - P. 929-938
10. C. E. Petoukhoff, M. B. M. Krishna, D. Voiry, I. Bozkurt, S. Deckoff-Jones, M. Chhowalla, D. M. O’Carroll, and K. M. Dani. Ultrafast Charge Transfer and Enhanced Absorption in MoS_2 -Organic van der Waals Heterojunctions Using Plasmonic Metasurfaces // ACS Nano. – 2016. – Vol. 10, - P.9899-9908.
11. A. Karmakar, A. Al-Mahboob, C. E. Petoukhoff, O. Kravchyna, N. S. Chan, T. Taniguchi, K. Watanabe, and K. M. Dani. Dominating Interlayer Resonant Energy Transfer in Type-II 2D Heterostructure // ACS Nano. -2022. – Vol.16, - P.3861-3869
12. Gusynin V.P., Sharapov S.G., Carbotte J.P. Magneto-optical conductivity in graphene // J.Phys Condens Matter. -2006. Vol.13, - P.026222.
13. Hanson G.W. Dyadic Green’s functions for an anisotropic, non-local model of biased graphene // IEEE Trans Antennas Propag . – 2008. Vol.5, - P. 747-57.
14. Gusynin V.P., Sharapov S.G., Carbotte J.P. On the universal ac optical background in graphene // New. J.Phys. – 2009. Vol. 11, - P.095013.
15. Dressel M., Gruner G. Electrodynamics of Solids. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2002. P.148.

16. Sounas D.L., Calos C. Gyrotropy and nonreciprocity of graphene for microwave applications // IEEE Trans Microw Theory Tech. -2012. Vol. 60, - P.901-14.
17. M. Acerce, D.Voiry, M. Chhowalla. Metallic 1T phase MoS₂ nanosheets as supercapacitor electrode materials // Nature Nanotechnology. – 2015. Vol.10, N 4. - P.313-318.
18. J.B. Cook, H. Kim, T.C. Lin, C. Lai, B. Dunn, S.H. Tolbert. Oxygen vacancies enhance pseudocapacitive charge storage properties of MoO₃-x // Adv. Energy Mater. – 2017. Vol. 7,N 2. –P. 1601283
19. J.A. Gigot, M. Fontana, M. Serrapede, M. Castellino, S. Bianco, M. Armandi, B. Bonelli, C.F. Pirri, E. Tresso, P. Rivolo. Mixed 1T-2H Phase MoS₂/Reduced Graphene Oxide as Active Electrode for Enhanced Supercapacitive Performance // ACS Appl. Mater. Interfaces. – 2016. Vol. 8, N 48,- P. 32842-32852
20. M. Usama Arshad, D. Dutta, Y. Y. Sin, S. W. Hsiao, C. Y. Wu, B. K. Chang, L. Dai, C. Y. Su Synthesis of 2D Molybdenum Disulfide (MoS₂) for enhancement of mechanical and electrical properties of polystyrene (PS) polymer // Carbon. -2022. Vol.195. –P. 141-15
17. W. Kohn, L. J. Sham. Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects // Phys. Rev.-1965. Vol.1133, -P.140.
18. A.D. Becke. Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange // J. Chem. Phys.-1993. Vol.98.no.7, - P.5648.
19. Lee C., Yang W., Parr R. G. Development of the Colle-Salvetti correlation-energy formula into a functional of the electron density // Phys. Rev. -1988.-Vol.785.-P.37.
20. E. Engel, S. H. Vosko. Exact exchange-only potentials and the virial relation as microscopic criteria for generalized gradient approximations// Phys. Rev.-1993.-Vol.13164. N 2, - P.47.

UDC 62-685

MODELING AND RESEARCH OF INVERTER FOR SOLAR POWER PLANT

Sagyndikova A.Z., Bolatuly R.

Non-profit JSC «Almaty University of Power Engineering and Telecommunications
named after Gumarbek Daukeyev», Almaty, Kazakhstan
e-mail: a.sagyndikova@aes.kz, r.bolatuly@aes.kz

Abstract. This paper presents a study of an adapted inverter for a 2.0 kW solar power plant, analyzing promising transistor inverters. The most optimal components in terms of price/performance ratio were selected for the development of the adapted inverter. First, a schematic of the solar power plant was assembled, including the

selection of necessary components, the design of the solar panel connection scheme, and the calculation of the total power of the solar power plant. Next, the transistor inverter circuit was assembled, with appropriate component selection, calculations, and the development of a connection scheme for the components. The total power of the solar power plant was calculated using the adapted inverter. The study also examines potential applications for such an inverter and determines what can be powered with its available capacity. The entire development process was simulated in MATLAB/Simulink.

Keywords: solar inverter, hybrid inverters, transistor inverter, grid-tied inverters, standalone inverters, adapted transistor inverter.

Introduction

Today, the question of whether our world will improve or deteriorate has become increasingly relevant. How will the quality of life change for people in different parts of the world? How will industries develop in various countries? What new creations will emerge and be called "new inventions"? Will global cataclysms occur that impact the environment, and, ultimately, could humanity cause significant harm to the environment?.

When it comes to the environment, there is no debate that humanity brings both benefits and harm to nature. In most cases, people rely on electricity for their needs and a comfortable life. However, in Kazakhstan, the method by which electricity is generated pollutes the atmosphere and contributes to global warming. Fortunately, humanity continues to progress, developing various alternatives that cause less harm or none at all. In our case, we are referring to «solar energy ».

Kazakhstan has a very high annual duration of sunlight, especially in the southern regions, ranging from 2,200 to 3,000 hours per year. In comparison, countries like Germany, the United Kingdom, Norway, and Japan receive less than 1,000 hours per year. This indicates that there is significant potential for «solar energy » in Kazakhstan. This paper aims to explore the system of generating solar electricity as well as its conversion into alternating current we commonly use. [1]

A solar inverter is a converter that transforms direct current (DC) generated by solar panels into alternating current (AC), adjusting the voltage and current while being limited by the inverter's power capacity, figure 1. [2]

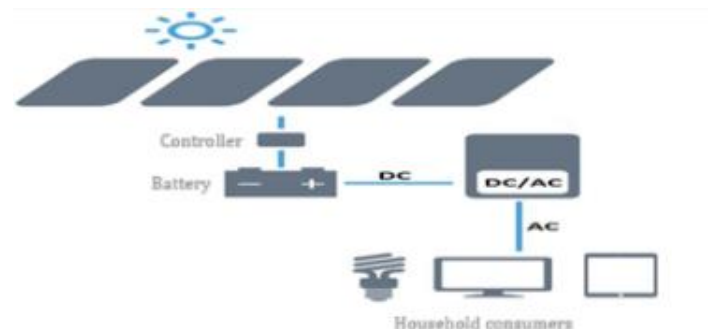


Figure 1 – Principle of solar energy conversation into Elecricity

Inverters are classified into three types

Standalone inverters – these can be used in areas isolated from the public grid thanks to solar panels that charge from sunlight many of them have connectors for additional electricity input from the grid if available [3]

Grid-tied inverters – these synchronize with the grid in terms of sine wave and phase of the current supplied to the network however in the event of a power outage this type of inverter shuts down because it lacks an additional power source. [4]

Hybrid inverters – this type of inverter operates using multiple power sources including solar panels batteries and the industrial power grid as a result it provides multiple energy supply options hybrid inverters can be used to save costs by occasionally bypassing the industrial grid as well as for standalone operation they are typically used for personal applications where battery backup ensures reliability [5]

Analysis of promising adapted transistor inverters

Modern transistor inverters are built using two types of transistors: MOSFETs and IGBT transistors.

After studying the material on transistor inverters, it becomes clear that the future of transistor inverters lies in those equipped with insulated gate bipolar transistors (IGBT), figure 2.

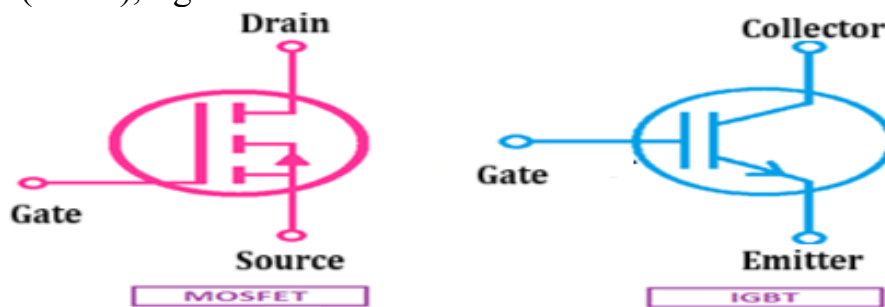


Figure 2 - MOSFET and IGBT transistors

What is the advantage of IGBT transistors in the long run?

First of all, IGBT transistors can operate at very high power levels. Power refers to both the operating currents passing through the transistor and the voltages that this type of transistor can withstand. Unlike high-frequency transistors with high-temperature tolerance, which correspond to the characteristics of MOSFETs, IGBTs are better suited for handling high power.

Modern IGBT transistors also operate at frequencies up to 150 kHz. In addition, the characteristics of IGBTs enable the development of efficient power converters for various applications and power levels [6].

Development of components for an adapted solar inverter

To develop the components of a 2 kW adapted solar inverter, we will create a circuit consisting of three MPPT solar panels. However, in this case, we will obtain a system with a nominal power of 750 W and a voltage of 104 V, while we require 2 kW, figure 3.

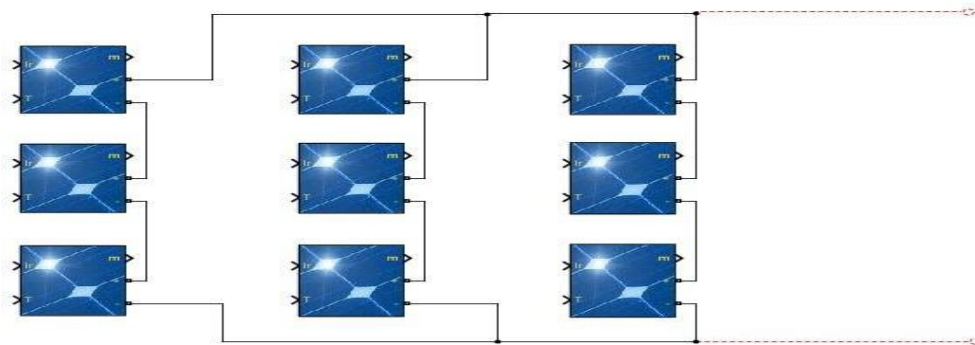


Figure 3 – Solar panel collection diagram

Therefore, we will add two more branches of the same type, resulting in a total power of 2250 W and an effective voltage of 72 V from the solar panel circuit.

When calculating a single circuit, the current remains unchanged when solar panels are connected in series, while the voltage increases. By calculating the current and voltage values of the connection circuit, we determine the power using formula (1.1).

$$P = 104V \cdot 21,6 A \approx 2250W, \quad (1.1)$$

here P – power; $U = 104V$ – voltage; $I = 21,6 A$ – current.

Development of the transistor switch connection circuit with the inverter

By selecting an N-channel MOSFET transistor, we assemble the circuit as follows: since it is an N-channel MOSFET transistor, the connection scheme of the transistor with the battery and transformer will be as shown in figure 4.

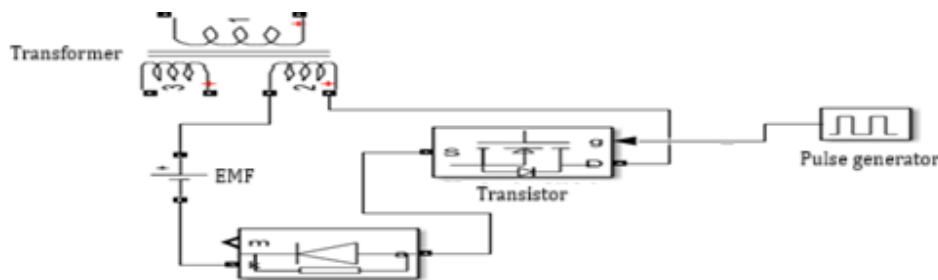


Figure 4 – Circuit diagram of the transistor switch connection with the inverter

A pulse generator will be connected to the gate, allowing the transistor to switch on. Next, the source is connected to a transformer, which is linked to the positive (+) terminal of the battery, while the drain is connected to the negative (-) terminal of the battery. To prevent transistor failure, a flyback diode is also connected to the transistor.

It turns out that one half-cycle lasts 10 ms. One transistor switches on at $t = 1$ ms and remains on throughout the entire half-cycle (1.2).

$$t_{1tr.s} = t_{hc} = 10\text{ ms}, \quad (1.2)$$

here $t_{tr.s}$ – switching time of a transistor; t_{hc} – half-cycle time.

Since all transistors turn on at equal time intervals and then turn off at equal time intervals, and there are a total of five transistors, the switching time is determined using formulas (1.3), (1.4), (1.5), and (1.6):

$$t_{2tr.s} = t_{1tr.s} - 20\% = 8\text{ ms}; \quad (1.3)$$

$$t_{3tr.s} = t_{1tr.s} - 40\% = 6\text{ ms}; \quad (1.4)$$

$$t_{4tr.s} = t_{1tr.s} - 60\% = 4\text{ ms}; \quad (1.5)$$

$$t_{5tr.s} = t_{1tr.s} - 80\% = 2\text{ ms}. \quad (1.6)$$

At the final stage, the consumption environment is connected to the inverter and the solar power plant. The connection diagram of the consumption environment to the adapted inverter and the solar power plant is shown in figure 5.

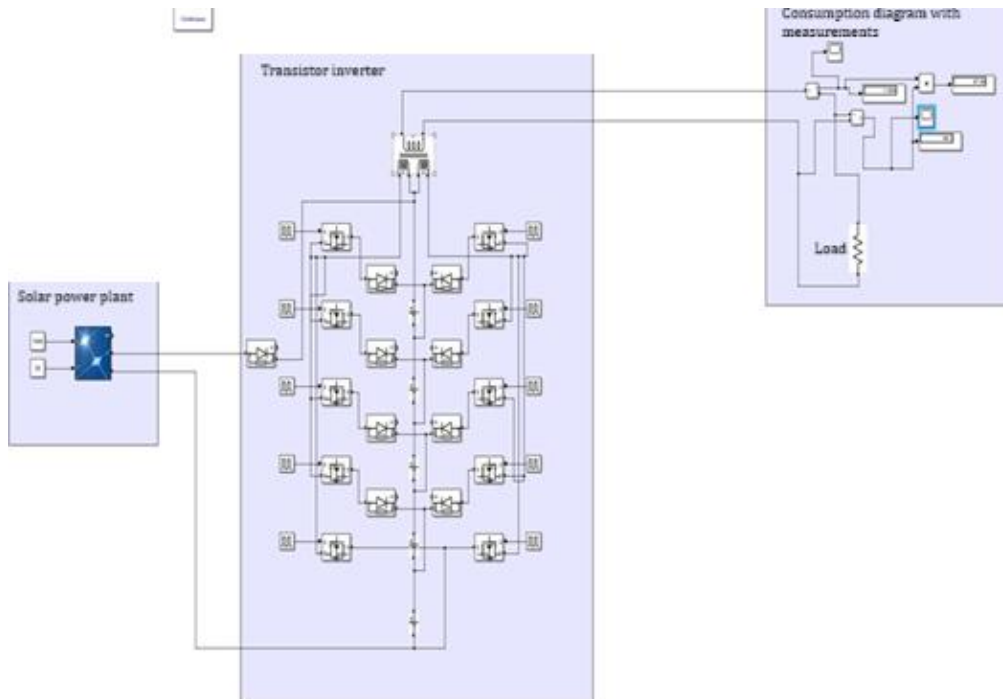


Figure 5 – General diagram of the solar power plant, adapted inverter, and consumption environment

Modeling of the electrical circuit for measuring the instantaneous power of a solar power plant using a 2 kW adapted inverter in the MATLAB/Simulink environment

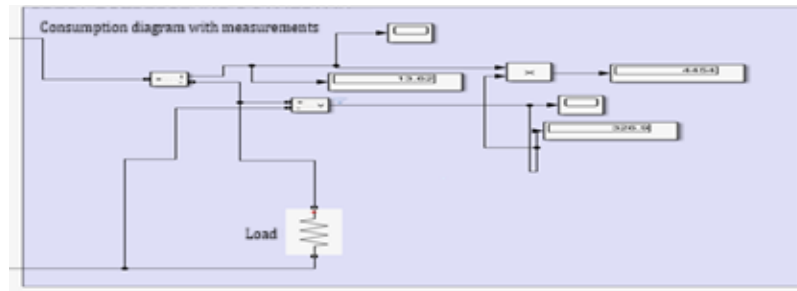


Figure 6 – Calculation of the instantaneous power of a solar power plant using a 2 kW adapted inverter in the MATLAB/Simulink environment

However, since we need the effective values of the generated electrical energy, as well as the harmonic deviation of the obtained graph from the sine wave, we connect two blocks. These blocks will convert the amplitude values of the electrical energy into effective values (Figure 7) and indicate the harmonic deviation of the obtained graph from the sine wave (Figure 8).

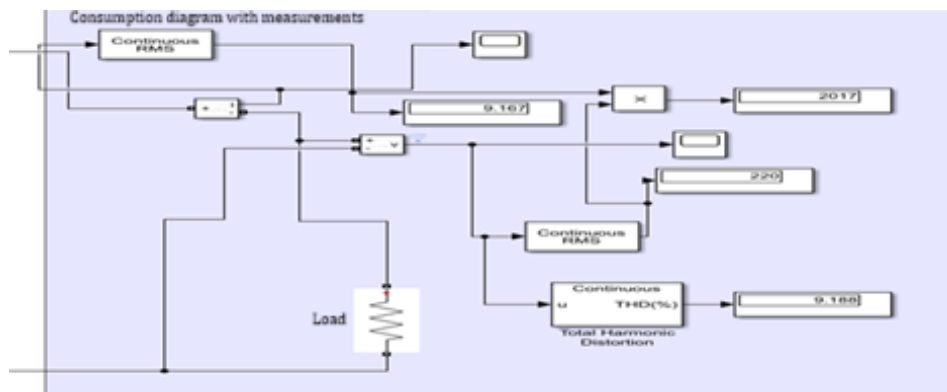


Figure 7 – Operating values of electrical energy

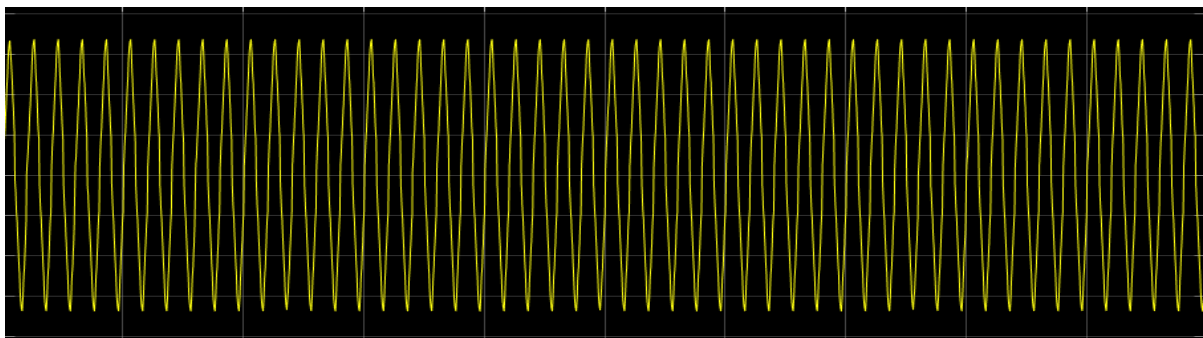


Figure 8 – Analysis of voltmeter readings

Conclusion

Analyzing the operation of the transistor inverter with the solar power plant, it is evident that the batteries operate autonomously while being recharged by the solar power plant. This is visible on the graph, as no power drop was observed over a long period. This indicates that the solar power plant supplies the batteries to maintain the required power levels.

REFERENCES

1. Mukazhanov V.N. Vozobnovlyаемые источники энергии: учебное пособие. – Алматы: AUES, 2010. – 80 p.
2. Rasmukhametova A.S. Zhangaırtýlatyn energiya kózderi: óku quraly. – Алматы: AUES, 2022. – 114 p.
3. E-Katalog. Kak vybrat' solnechnyy inverter: printsipy raboty i osnovnye kharakteristiki [Online] – Available at: bit.ly/3XHINz6 (accessed 3 April 2025).
4. Shielden. Setevye solnechnye invertory: chto vam nuzhno znat' [Online] – Available at: <https://bit.ly/4iMZ6TL> (accessed 3 April 2025).
5. Vybiraem inverter: setevoy, avtonomnyy ili gibridnyy – chto vam podkhodit? [Online] – Available at: <https://bit.ly/4la6ZUG> (accessed 13 March 2025).
6. Popov V.N., Egorov A.S. Silovaya elektronika: printsipy i primeneniye., - Lan', Moskva, - 2020. – 320 p.

УДК 620.91

ЖЭС-ТІҢ ОҢТАЙЛЫ ОРНАТЫЛҒАН ҚУАТЫН АНЫҚТАУ БАРЫСЫН ТАЛДАУ

***Кенжебаев Ә.Ә., Сагындикова А.Ж.**

Алматы Энергетика және Байланыс Университеті, Қазақстан Республикасы,
Алматы қ.

Бұл жұмыста тұтынушылардың қажеттіліктері мен жүктеме сипатын ескере отырып, жел энергетикалық станцияларының (ЖЭС) оңтайлы белгіленген қуатын анықтау мәселесі қарастырылады. Зерттеудің мақсаты-жел ресурстарына негізделген электр энергиясын өндіру мен тұтынуды теңестіруге, шығындарды азайтуға және энергия жүйесінің тиімділігін арттыруға мүмкіндік беретін әдіснаманы әзірлеу. Жұмыста жел жүктемесінің өзгеруі, географиялық және климаттық жағдайлар, сондай-ақ экономиканың әртүрлі секторларындағы энергия тұтыну ерекшеліктері сияқты ЖЭС қуатын таңдауға әсер ететін факторларға талдау жүргізілді. ЖЭС-ті қолданыстағы энергия жүйелеріне интеграциялау мәселелеріне, соның ішінде энергия өндіруді болжау және ең жоғары жүктемелерді басқару мәселелеріне ерекше назар аударылды.

Есептеулердің жоғары дәлдігін қамтамасыз ететін және аймақтық энергия жүйелерінің ерекшеліктерін ескеретін математикалық модельдеу және оңтайландыру әдістері ұсынылған. Зерттеу генерация мен тұтыну арасындағы теңгерімсіздікті азайтуға, сондай-ақ дәстүрлі энергия көздеріне тәуелділікті азайтуға мүмкіндік беретін алгоритмдерді әзірледі. Жұмыстың негізгі қорытындылары генерацияны бөлуді басқаруды жақсартуға, энергия жүйелерінің тұрақтылығын арттыруға және экологиялық жүктемені азайтуға бағытталған. Зерттеу нәтижелері ЖЭС жоспарлау және жобалау үшін, сондай-ақ әртүрлі климаттық және экономикалық жағдайлары бар аймақтарда жаңартылатын энергетиканы дамыту стратегияларын әзірлеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Кіріспе

Қазіргі таңда энергетикалық жүйелер көміртегі ізін азайту және тұрақты дамуды қамтамасыз етудің жаһандық қажеттілігіне байланысты жаңартылатын энергия көздерін (ЖЭК) дамытуына көп көңіл бөлуде. Жел энергетикасы ЖЭК арасында жоғары экологиялық таза және қайта пайдалану мүмкіндігі арқасында маңызды орын алады. Алайда жел энергетикасы станцияларын (ЖЭС) энергия жүйесіне тиімді интеграциялау олардың оңтайлы қуатын анықтауға байланысты мәселелерді мұқият қарастыруды талап етеді. [1]

ЖЭС-ті жобалау және пайдалану кезіндегі негізгі сын-қатерлердің бірі- белгіленген қуатты оңтайлы таңдау қажеттілігін анықтайтын энергия тұтынудың сипаты мен өзгергіштігін ескеру. Жеткіліксіз жоғары қуат генерациялау мүмкіндіктерін толық пайдаланбауға әкелуі мүмкін, ал артық қуат артық өндіріс пен энергияны сақтауға қосымша шығындар тудырады.

Зерттеу тұтынушылардың жүктемесін ескере отырып, ЖЭС-тің оңтайлы белгіленген қуатын анықтау тәсілін әзірлеуге бағытталған. Бұл электр энергиясын өндіру мен тұтынуды теңестіруге, шығындарды азайтуға және электр желісінің жалпы тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Жұмыста генерация мен тұтынуға әсер ететін факторлардың алуан түрлілігін, энергияны тұтыну құрылымын және жүктемені басқару технологияларын ескеретін модельдеу және оңтайландыру әдістері қарастырылады.

Соңғы жылдары ЖЭС-ын пайдалану олардың өнімділігі мен сенімділігін арттыруға мүмкіндік берген технологиялық жетістіктердің арқасында тұрақты өсуді көрсетті. Дегенмен, табиғи жағдайларға, атап айтқанда желдің жылдамдығы мен тұрақтылығына жоғары тәуелділік генерацияны дәл жоспарлауда қиындықтар туғызады. Бұл жүктемені оңтайлы бөлу міндетін қиындатады және қуатты басқарудың икемді стратегияларын қолдануды талап етеді, әсіресе ЖЭС-ті қолданыстағы инфрақұрылыммен энергия жүйесіне интеграциялау кезінде.

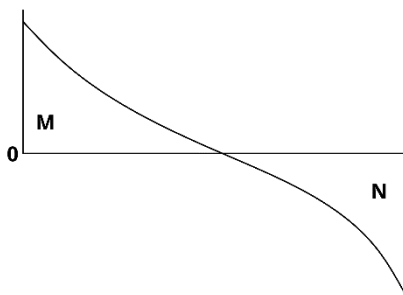
ЖЭС қуатын тұтынушылардың қажеттіліктеріне бейімдеуге бағытталған тәсілдерді практикаға енгізу энергия жүйесінің тұрақтылығын жақсартуға және оның дәстүрлі энергия көздеріне тәуелділігін төмендетуге ықпал етеді. Бұл өз

кезегінде энергиямен жабдықтауды оңтайландыруға ғана емес, сонымен қатар ЖЭК енгізудің экономикалық тартымдылығын арттыруға мүмкіндік береді. Бұл жұмыс ЖЭС жұмысының әртүрлі сценарийлерін бағалау үшін математикалық модельдер мен бағдарламалық құралдарды пайдалануды қамтитын кешенді тәсілдің маңыздылығын көрсетеді. [2]

Мақсаты: Берілген тұтынушыны электр энергиясымен қоректеу. ЖЭС-ның оңтайлы орнатылған қуатын анықтау. Электр энергияны тұтынудың және өндірудің балансын табу.

Материалдар мен әдістері

1. В.М. Осиповтың мақаласында [3] жел электр станциясының белгіленген қуаты мен жүктеме арасындағы ең тиімді қатынас ЖЭС-тің белгіленген қуаты мен конфигурациясы арасындағы ең тиімді қатынасты алудың негізгі проблемалары туралы жазылған. Кез келген уақытта ЖЭС қуаты мен кернеу арасындағы теңдік өте қолайлы болар еді, бірақ желдің кездейсоқ сипатына байланысты бұл мүмкін емес. Осипов желідегі энергия ағындарын азайта отырып, тұтынушылардың ЖЭС энергиясының максималды үлесін пайдалануы болып табылатын тиімділік критерийлерін пайдалануды ұсынады.



1 сурет – Қуат үшін жылдық ұзақтық графигі

Жоғарыда айтылғандардан, жүктеме мен ЖЭС-тің белгіленген қуаты арасындағы ең тиімді қатынастың шарты теңдік болуы мүмкін екендігі анық.

$$M + N = \min,$$

мұндағы М - жүктеме графигін қамтудағы жүйенің жылдық үлесі; N-жергілікті тұтынушылар жыл бойы пайдаланбаған ЖЭС энергиясы.

Мақалада энергиямен жабдықтау жүйесіндегі, әсіресе ауылшаруашылық мақсаттары үшін жел электр станцияларының (ЖЭС) қалыпты жұмыс режимі ұсынылған. Электр желісінің белгіленген қуаты мен конфигурациясы арасындағы ең тиімді қатынасты іздеуге баса назар аударылады, бұл электр желілеріндегі энергия ағындары мен шығындарды азайтуға мүмкіндік береді.

ЖЭС-тің оңтайлы қуаты орташа жүктемеге байланысты және жел жылдамдығының таралуын реттеуге байланысты емес. Желдің орташа жылдамдығы неғұрлым жоғары болса, тұтынушылар ЖЭС қуатын соғұрлым көп

пайдаланады. ЖЭС орташа жүктемелер мен кедергілермен анықталатын байланыс желілеріндегі энергия шығынын азайтады. ЖЭС генераторларындағы кернеуді реттеу жүйенің тұрақтылығын төмендетуі мүмкін, сондықтан қажет емес.

Негізгі мақсат-ЖЭС энергиясын орталық желіге кетудің орнына жақын тұтынушылар пайдаланатын режимді табу.

2. Мақалада Ганиев З.С. [4] жаңартылатын энергия көздері негізінде Энергия кешенінің жұмыс режимдерін оңтайландыру, электр станцияларының (ЖЭС, СЭС және МГЭС) оңтайлы белгіленген қуаттарын таңдау алгоритмі әзірленді.

ЭКНС құрамына кіретін электр энергиясының белгіленген қуатын дұрыс және оңтайлы таңдау үшін автор есептеу алгоритмін жасады. Алгоритмнің мәні келесідей. Күн (СЭС), жел электр станциясы (ЖЭС) және экнс құрамында шағын – гидроэлектростанция (МГЭС) сияқты электр энергиясының көздерін орнатуға мүмкіндігі бар орталықтандырылмаған ауданда болсын. Номиналды белгіленген қуатын дұрыс және оңтайлы таңдау үшін станцияның белгілі бір түрін орнату мүмкіндігі туралы бастапқы мәліметтер қажет. Егер жүктеменің сипаты және оның жыл мезгілдеріндегі өзгеру кестесі, сондай-ақ электр энергия көзін жобалау және салу бойынша техникалық мүмкіндіктер белгілі болса, алгоритм ЭКНС станцияларының белгіленген қуатын дұрыс және оңтайлы таңдауға мүмкіндік береді. Есептеу кезінде электр желілеріндегі белсенді қуаттың жоғалуын ескеру қажет.

Бастапқы деректерді өндегеннен кейін және көздердің белгіленген қуатының мүмкін нұсқасын анықтағаннан кейін келесі шартты ескеру қажет:

$$P_{\text{ном.орн.}} \leq P_{\text{тех.мүмк.}}$$

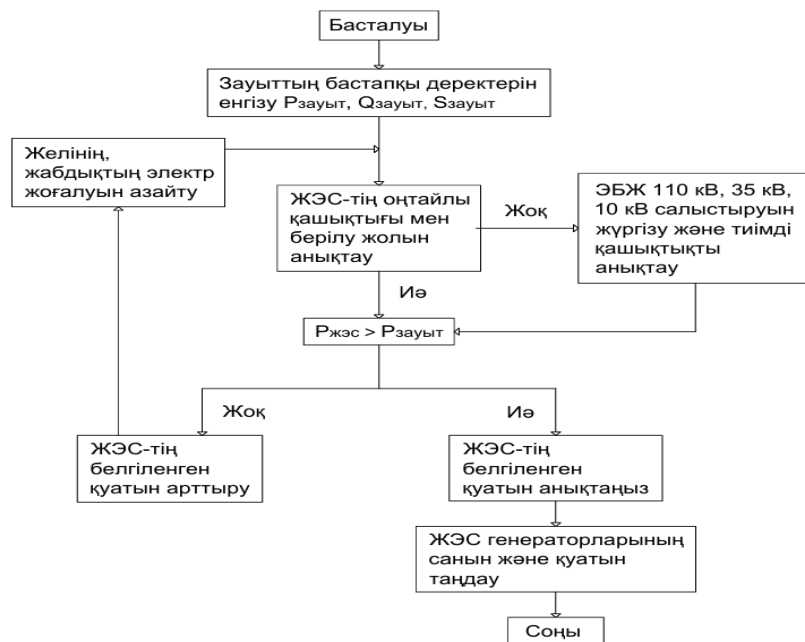
Осыдан кейін, жүктеме қуаты мен өндірілетін қуаттың белгілі мәні кезінде кез-келген уақытта белсенді қуаттың тепе-теңдігі жасалады. Есептеу кезінде уақыттың әр сәтінде шарт бар екенін ескеру қажет:

$$P_{\text{МГЭС}}^i = P_{\text{КЭС}}^i + P_{\text{ЖЭС}}^i - P_{\text{жүк.}}^i - \Delta P_{\text{тұт.}}^i \geq 0$$

орындалуы керек. Егер шарт орындалмаса, онда электр энергиясының белгіленген қуатын азайту керек және есептеу қайтадан қайталанады. Шарттарды орындау кезінде қуат балансының теңдеуі жасалады. Көздердің қуатын таңдауды есептеу кезінде СЭС пен ЖЭС-тің өндірілетін қуаттарын барынша пайдалануға басымдық берілетінін ескеру қажет, өйткені бұл ретте Жоғарғы резервуарда МГЭС жұмысы үшін су жинақталады. Айта кету керек, МГЭС қуаты нөлден кем болмауы керек.

Қарастырылған алгоритмде (2 сурет) тұтынушының жүктемесін ескере отырып оны электрмен қамтамасыздандыру үшін ЖЭС-ның оңтайлы орнатылған

қуатын анықтайды. Алдымен тұтынушыға қажет жалпы электр энергиясының қуат көлемін, оның энергия шығынын, жүктеме графигін анықтап алу керек.



2 сурет – ЖЭС-тің оңтайлы орнатылған қуатын анықтауға арналған алгоритм

Жел электр станциясын (ЖЭС) зауыттан 3 км қашықтықта орнатуды талдау [5]:

1) Электр энергиясын беру кезінде шығындарды азайту

- Шығынның төмендеуі: электр энергиясының берілуі әрдайым қашықтықтың өсуіне байланысты шығындармен байланысты. 3 км қашықтықта шығындар минималды болады, әсіресе кернеуі 35 кВ желіде. Бұл ЖЭС өндірген энергияны максималды тиімділікпен пайдалануға мүмкіндік береді.

- Кернеудің тұрақтылығы: ЖЭС-тің зауытқа жақын орналасуы сонымен қатар тұрақты кернеу мен энергиямен жабдықтау сенімділігіне ықпал етеді, бұл әсіресе өнеркәсіптік тұтынушылар үшін маңызды.

2) Экономикалық тиімділік

- Электр беру желісінің құнын төмендету: ЖЭС неғұрлым алыс орналасса, электр беру желілерін орнату және қызмет көрсету шығындары соғұрлым жоғары болады. 3 км қысқа қашықтық инфрақұрылымға күрделі салымдар мен техникалық қызмет көрсету шығындарын айтарлықтай азайтады.

- Пайдалану шығындарын азайту: қысқа қашықтықта пайдалану шығындары және жиі техникалық қызмет көрсету қажеттілігі азаяды, бұл жобаның жалпы шығындарын азайтуға көмектеседі.

3) Жедел басқару және бақылау

- Жеңілдетілген басқару және бақылау: ЖЭС пен зауыт арасындағы қысқа қашықтық басқаруды жеңілдетеді және қуат қажеттіліктерінің өзгеруіне немесе ақаулардың пайда болуына жылдам жауап беруге мүмкіндік береді.

- Интеграция мүмкіндігі: ЖЭС-тің зауытқа жақындығы оның жұмысын кәсіпорынның негізгі энергетикалық жүйелерімен біріктіруді жеңілдетеді және энергияны өндіру мен тұтынуды жақсырақ үйлестіруге мүмкіндік береді.

4) Экологиялық артықшылықтар

- Шудың төмендеуі: 3 км қашықтықта турбиналардың жұмысынан шыққан шу мен діріл зауыт пен оның қызметкерлері үшін іс жүзінде сезілмейді.

- Ауа-райына төзімділік: Бұл қашықтықта ауа-райы жағдайлары (мысалы, жел немесе жаңбыр) электр желісіне минималды әсер етеді, бұл энергиямен қамтамасыз етудің сенімділігін арттырады.

5) Генерация мен тұтынуды басқарудағы икемділік

- Таратылған генерацияны қолдау: ЖЭС-тің осы қашықтықта орналасуы жергілікті, таратылған энергия генерациялау жүйесін құруға мүмкіндік береді, онда зауыт сыртқы электр энергиясын жеткізуден қосымша тәуелсіздік алады.

- Өндірістің үздіксіздігін қамтамасыз ету: Генерацияның тұтыну орнына жақындығы желідегі шектеулер мен апаттарға тәуелділікті азайту арқылы зауыттың энергетикалық автономиясын арттырады, бұл өндірісті сыртқы факторларға төзімді етеді.

Осылайша, зауыттан 3 км қашықтықта ЖЭС орнату-бұл экономикалық тиімді, экологиялық тұрақты және энергиямен жабдықтау сенімділігін арттыруға ықпал ететін негізделген шешім.

Нәтижелер және талқылау

Тұтынушы зауыттың бастапқы берілгендері: $S_{\text{зауыт}} = 17855$ кВА;

$P_{\text{зауыт}} = 17617$ кВА; $Q_{\text{зауыт}} = 2783$ кВА;

Тіректердің құнын анықтау [6]:

$$SK_{\text{ЭБЖ}} = K_{\text{ЭБЖ}} \cdot l = 9064489 \cdot \text{тг/км} \cdot 3 \text{ км} = 27193467 \text{ тг.} \quad (1.1)$$

35 кВ ЭБЖ-дегі шығындар:

$$R = r_0 \cdot l = 0,198 \cdot 3 = 0,594 \text{ Ом}; \quad (1.2)$$

$$\Delta W_{\text{ЛЭП110}} = N \cdot 3 \cdot I_{\text{р.ЛЭП}}^2 \cdot R \cdot 10^{-3} \cdot \tau; \quad (1.3)$$

$$\Delta W_{\text{ЭБЖ35}} = 2 \cdot 3 \cdot 136,1^2 \cdot 0,594 \cdot 10^{-3} \cdot 3521 = 232444,87 \text{ кВт} \cdot \text{сағ.}$$

35 кВ электр беріліс желісін техника - экономикалық есептеу жүргізу.

Таңдалған барлық электр құрылғыларының бағасы (капиталдық шығындар), сонымен қатар өндіріс жабдыктарының амортизациясына кеткен жылдық ұсталымдар, электр энергиясының шығыны мен эксплуатациялық шығындар есептеледі. Жылдық келтірілген шығындар [7] формула арқылы анықталады:

$$З = E \cdot K + И, \text{ тг/жыл} \quad (1.4)$$

Электр жабдықтарының бағасы зауыт-өндірушінің бағасымен немесе анықтамадағы мәлімет бойынша анықталады.

– Барлық капиталды шығындардың қосындысы:

$$SK = K_{QF1, QF2} + K_{QF3, QF4} + K_{QS1-QS4} + K_{QS5, QS6} + K_{OPH1-OPH6} + K_{ГПП \text{ тр}} + K_{ЛЭП} = 11,4 + 11,4 + 5,1 + 1,98 + 0,3 + 79,4 + 27 = 136,58 \text{ млн. тг.}$$

$$И_{а.қонд.} = E_{а.қонд.} \cdot K_{қонд.} = 0,063 \cdot (136,58 - 27) = 6,9 \text{ млн. тг.}$$

$$И_{а.к.желі.} = E_{а.к.желі.} \cdot K_{желі.} = 0,028 \cdot 27 = 0,75 \text{ млн. тг.}$$

$И_a$ – амортизациялық аударымдар; E_a – нормативтік аударымдар.

$$SI_a = И_{а.қонд.} + И_{а.к.желі.} = 6,9 + 0,75 = 7,65 \text{ млн. тг.}$$

$$И_{э.қонд.} = E_{э.қонд.} \cdot K_{қонд.} = 0,01 \cdot (136,58 - 27) = 1,1 \text{ млн. тг.}$$

$$И_{э.к.желі.} = E_{э.к.желі.} \cdot K_{желі.} = 0,004 \cdot 27 = 0,1 \text{ млн. тг.}$$

$И_э$ – пайдалануға кеткен шығындар; $E_э$ – техникалық жөндеу шығындары.

$$SI_э = И_{э.қонд.} + И_{э.к.желі.} = 1,1 + 0,1 = 1,2 \text{ млн. тг.}$$

$$И_{жоғ.} = C_0 \cdot (\Delta W_{ГПП} + \Delta W_{ЛЭП}) = 22 \cdot (371688 + 232444,87) = 13,3 \text{ млн. тг.}$$

$И_{жоғ.}$ – электр энергиясының жоғалуы

C_0 – электр энергиясын жоғалту құны

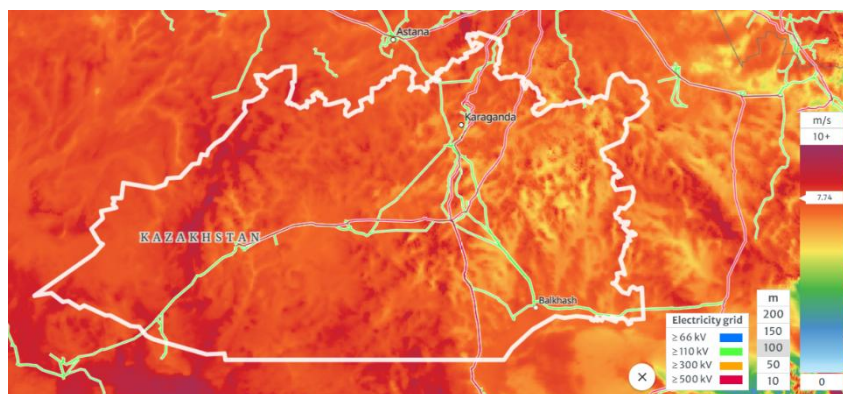
$$SI = И_a + И_э + И_{жоғ.} = 7,65 + 1,2 + 13,3 = 22,15 \text{ млн. тг.}$$

$$З = E \cdot K + SI = 0,12 \cdot 136,58 + 22,15 = 38,5 \text{ млн. тг.}$$

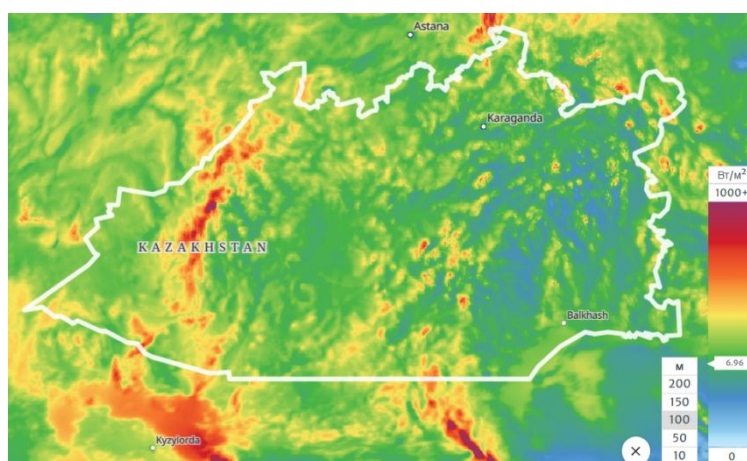
мұндағы E – капиталдық салымның тиімді коэффициенті; K – капиталдық шығындар; $И$ – өндірістің жылдық шығындары.

1 кесте – 35 кВ ЭБЖ-ға кеткен жвлпы шығындар

Кернеу	SK, млн.тг	И _а , млн.тг	И _э , млн.тг	И _{жоғ} , млн.тг	З, млн.тг
35 кВ	136,58	7,65	1,2	13,3	38,5



3 сурет – Қарағанды облысындағы 100 м биіктіктегі жел жылдамдығы



4 сурет – 100 м биіктіктегі қуаттың орташа тығыздығы

ЖЭС қуатын бастапқы есептеу үшін турбиналардың қандай қуаты мен саны зауыттың 17,8 МВА қажеттілігін қамтамасыз ете алатынын анықтаймыз:

1) Тиімді қуат: 4 суретте [8] желдің тығыздығы 400 Вт/м² және 3 суретте орташа жылдық жылдамдығы 7 м/с турбиналардың өнімділігін бағалауға мүмкіндік береді.

2) Белгіленген қуатты пайдалану коэффициенті: Қарастырылатын GoldWind GW 140/3000 турбинасы үшін 30%.

Есептеу қадамдары:

1) Жылдық энергия қажеттілігін бағалау:

Жеңілдету үшін зауыт тәулік бойы толық қуатта жұмыс істейтінін қабылдаймыз:

$$E_{\text{зауыт}} = E_{\text{зауыт}} \cdot t_{\text{жыл}} \quad (2.1)$$

$$E_{\text{зауыт}} = 17,8 \text{ МВА} \cdot 365 \text{ күн} \cdot 24 \text{ сағ} = 155928 \text{ МВт} \cdot \text{сағ}$$

2) Бір турбинаның жылдық энергия өндірісі:

$$E_{\text{турбина}} = P_{\text{турбина}} \cdot k_{\text{киум}} \cdot t_{\text{жыл}} \quad (2.2)$$

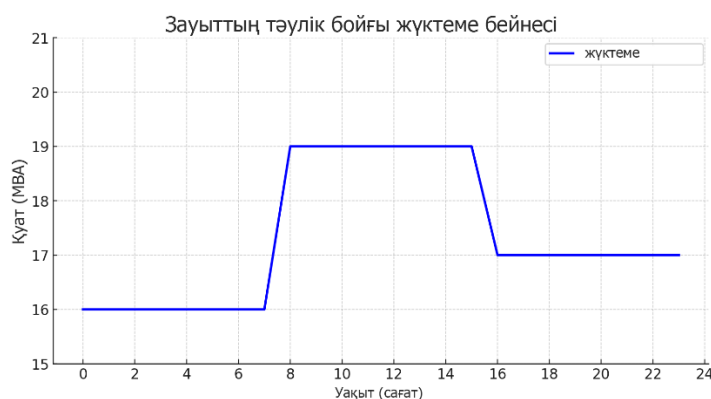
$$E_{\text{турбина}} = 3 \text{ МВА} \cdot 0,3 \cdot 8760 \text{ сағ} = 7884 \text{ МВт} \cdot \text{сағ}$$

3) Турбиналардың қажетті саны:

Турбиналардың санын бағалау үшін зауыттың жылдық қажеттілігін бір турбинаның жылдық өндірісіне бөлу қажет. [9]

$$N = \frac{E_{\text{зауыт}}}{E_{\text{турбина}}} = \frac{155928}{7884} = 19,7 \approx 20 \quad (2.3)$$

Осылайша, желдің берілген жағдайында зауыттың жылдық қажеттілігін жабу үшін 3 МВт қуаттылығы бар 20-ға жуық турбина қажет болады. 20 Жел электр турбинасын зауыттың толықтай тұтынуын қамтамасыз етуін математикалық жолмен график түрінде көрсетемін.



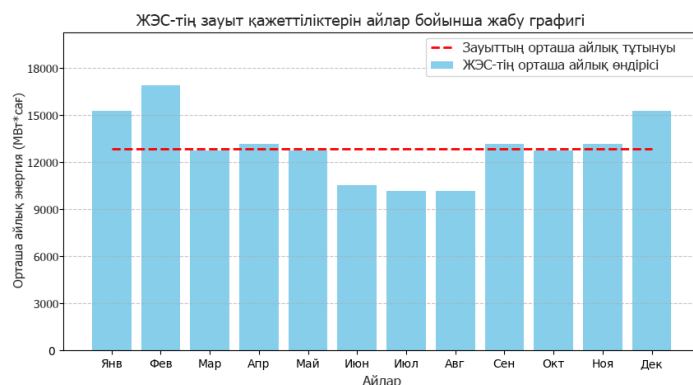
5 сурет – Тәулік бойы зауыт жүктемесінің бейінінің графигі

5-ші суретте зауыттың жүктеме бейінінің кестесі кәсіпорындағы электр энергиясын тұтынудың белгілі бір уақыт ішінде қалай өзгеретінін көрсетеді. Бұл график тәулік ішіндегі максималды және минималды жүктемесін көруге, сондай-ақ ең жоғары тұтыну кезеңдерін анықтауға мүмкіндік береді. Оның негізгі мақсаттары:

- Тұтынуды оңтайландыру: график зауыттың электр энергиясының ең көп мөлшерін қашан тұтынатынын түсінуге көмектеседі, бұл жабдықтың жұмыс кестесін реттеуге немесе жүктеменің бір бөлігін тарифтері төмен кезеңдерге ауыстыруға мүмкіндік береді.

- Шығындарды азайту: ең жоғары тұтыну кезеңінде энергияны үнемдеу шараларын алып тастауға және энергия шығындарын азайтуға болады.

- Қуатты жоспарлау: ағымдағы қуаттың зауыттың қажеттіліктерін қанағаттандыру үшін жеткілікті екенін бағалауға көмектеседі, әсіресе өндірісті кеңейту қажет болса.



6 сурет – ЖЭС-тің зауыт қажеттіліктерін айлар бойынша жабу графигі

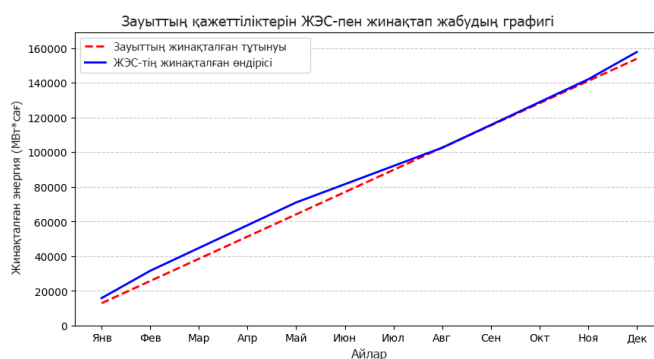
6 суретте көк бағандар бұл ЖЭС-тің энергия өндіру көлемі [10]. Қызыл нүктелі сызық бұл зауыттың тұтыну көлемін көрсетеді. Бұл график ЖЭС өндіретін қуаттың зауыттың ай сайынғы тұтынуын қаншалықты жабуға қабілетті екенін көрсетеді. Жел генерациясының маусымдық ауытқуларын кәсіпорындардың электр энергиясына деген тұрақты немесе өзгермелі қажеттіліктерімен байланыстыруға көмектеседі. Ол үшін ЖЭС-тің зауыттық өндірісіне сәйкес келетін энергиямен қамту графигі қажет:

- Желіге байланысты мысал: ЖЭС өндірісін қолдана отырып, зауыттың тұрақсыз болуы мүмкін екенін және қай айларда сыртқы желіден көбірек энергия сатып алу керектігін нақты көруге көмектеседі.

- ЖЭК-ін пайдалануды жоспарлау: әртүрлі айларда ЖЭК-нен қандай энергия көлемін күтуге болатынын және оларды зауыттың энергия жүйесіне қалай жақсырақ біріктіруге болатынын түсінуге мүмкіндік береді.

- Артық энергияны немесе энергия тапшылығын бағалау: егер ЖЭС нақты уақыт режимінде зауытқа қажет мөлшерден көп энергияны жіберсе, график энергияны сақтау немесе сату үшін пайдалануға болатын артық мөлшерді бағалауға мүмкіндік береді. Жетіспеушілік жағдайында жетіспейтін энергияны сатып алуды жоспарлау.

- Шығындарды оңтайландыру: ай сайынғы электрмен қамтуды білу тұтыруды ЖЭС-тің максималды қуатын алу үшін реттеуге мүмкіндік береді, бұл электр энергиясын сатып алу шығындарын пайдалануға мүмкіндік береді.



7 сурет – ЖЭС өндірумен зауыттың қажеттіліктерін энергияны жинақтап жабу кестесі

7-ші суретте ЖЭС-тің зауыттық өндірісіне сәйкес келетін жабындарды жинақтау графигі көрсетілген [11]. ЖЭС-тің энергиясын өндіру мен зауыттың қажеттіліктері арасындағы жинақтаушы теңгерімді көрсетеді. Зауыттың тұтынуымен салыстырғанда ЖЭС-тің артық немесе төмен энергия өндіруін біртіндеп қалай жинақталатынын көрсетеді. Ол үшін ЖЭС өндірумен зауыттың жабындысын толықтыру графигі қажет:

- Жинақталған тапшылық пен профицитті бақылау: кесте уақыт өте келе тапшылықтың немесе артық энергияның қалай жиналатынын және зауыт жылдың қай сәтінде осындай өзгеріске қол жеткізетінін көруге мүмкіндік береді.

- Энергиямен жабдықтауды оңтайландыру стратегиясы: бұл кесте ЖЭС-ті дамыту бойынша іс-шараларды жоспарлауға көмектеседі: мысалы, үзілістерді болдырмау үшін энергияны үнемдеуді күшейту немесе сыртқы желіні сатып алуды арттыру қажет болғанда.

- Артық энергияны қолдануды жоспарлау: егер белгілі бір уақытқа дейін сақтандыру профициті жиналса, оны басқа қажеттіліктер үшін пайдалануға болады, мысалы, батареяларды зарядтау, сату немесе өндіріс төмендеген кезеңдерде пайдалану.

- Энергияны сатып алуды дәлірек жоспарлау: зауыт қанша энергия сатып алу керектігін немесе ЖЭС-ке толық сенім артуға болатынын болжай алады. Резервтерді алдын-ала анықтауға және жетіспеушілік шараларын жоспарлауға мүмкіндік береді.

Қорытынды

17,8 МВА қуаты бар зауыттың қажеттіліктерін жабу үшін ЖЭС-тің оңтайлы белгіленген қуатын анықтау бойынша жұмыс барысында бірқатар маңызды кезеңдер орындалды. Алдымен зауыт негізгі тұтынушы ретінде таңдалды, содан кейін зауыттан 3 км қашықтықта ЖЭС салу алаңы анықталды. ЖЭС-ті зауытқа қосу үшін кернеуі 35 кВ электр беріліс желісі жобаланған және оның жалпы шығындары есептелінді.

ЖЭС өндіретін электр энергиясы зауыттың тұтынуын толықтай жауып бере алатындай саны таңдалды. Тұтыну мен өндіру графиктерін тұрғызып, олардың нәтижесінде ЖЭС-ы зауыттың мұқтаждығын жауып бере алатындығын көре алдық. Энергияны жинақтау графигі тапшылық немесе артық энергия өндіру кезеңдерін тиімді пайдалануға көмек беріп отырады.

Жүргізілген есептеулер мен графиктерді талдау нәтижесінде әрқайсысының қуаты 3 МВт болатын 20 турбинасы бар ЖЭС таңдалған конфигурациясы зауыттың қажеттіліктерін оңтайлы жабуға мүмкіндік береді деген қорытындыға келдім. Таңдалған қуат жел ресурстарын тиімді пайдалануды қамтамасыз етеді, электр энергиясын сатып алу шығындарын азайтады және кәсіпорынның тұрақтылығына ықпал етеді.

Пайдаланылган әдебиеттер тізімі

1. Рыбин, В.А., Захаров, А.В. Ветроэнергетика: Учебное Пособие – Минск: БНТУ, 2008. – 358 с.
2. Киселев, И.А. Альтернативная энергетика: Ветроэнергетические установки – Москва: МЭИ, 2020. – 398 с.
3. Кутявин, И.Д. Наивыгоднейшее соотношение между установленной мощностью ветроэлектростанции и нагрузкой – Томск, 2000. – 214 с.
4. Ганиев, З.С. Оптимизация режимов работы энергокомплекса на базе возобновляемых источников энергии – Душанбе, 2024. – 172 с.
5. Колесников, А.А. Основы проектирования ветроэнергетических установок – Минск: БНТУ, 2022. – 89 с.
6. Кирпичников, И.М., Соломин, Е.В. Возобновляемые источники энергии учебное пособие к практическим занятиям – Москва: Форум, 2010. – 351 с.
7. Stefano Landini, Wind farm availability and power performance efficiency variability over life time – University of East Anglia, 2016. – 21p.
8. <https://globalwindatlas.info/en/>
9. Велькин, В.И. Методология расчета комплексных систем ВИЭ для использования на автономных объектах – Москва: РадиоСофт, 2014. – 245 с.
10. Иванов, А.В., Петров, С.И. Ветроэнергетические установки: проектирование, оптимизация и интеграция в энергосистемы – Москва: 2017. – № 4(25). – 108-115 с.
11. Козлов, В.А., Сидоров, Д.Н. Методы оптимизации мощности ветроэнергетических станций в условиях переменной нагрузки – Екатеринбург: УрФУ, 2015. 279 с.

УДК 620.92:662.767:630*232.326(574)

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ДЕРЕВА «ПАВЛОВНИЯ» ДЛЯ ПИРОЛИЗНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В КАЗАХСТАНЕ

Хамит И., Нигматуллин Р. М., Казанина И.В.

Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева

e-mail: i.khamit@auces.kz

1 Введение

Оценка потенциала использования биомассы для производства электроэнергии в Казахстане: экологические и экономические аспекты

В Казахстане доля ископаемых видов топлива в энергетическом балансе превышает 89 %, на возобновляемые источники приходится менее 3 %. В условиях растущих энергетических потребностей и обязательств по декарбонизации возникает необходимость поиска альтернативных источников

энергии. Биомасса — один из перспективных ресурсов, особенно для сельскохозяйственных регионов. Она охватывает широкий спектр материалов: растительные остатки, животноводческие отходы, древесину, энергокультуры. По данным исследований, в Казахстане ежегодно образуется более 37 млн т остаточной биомассы; при этом значительная доля этих отходов сжигается на полях или складывается на полигонах, что приводит к выбросам парниковых газов и загрязнению воздуха.

Выбор Казахстана как объекта исследования обусловлен несколькими факторами:

1. высокий потенциал сельского хозяйства и животноводства;
2. неравномерность распределения энергоресурсов по регионам;
3. необходимость диверсификации энергетического баланса;
4. близость рынков Центральной Азии, где опыт использования биомассы пока ограничен.

Цель работы — оценить теоретический и экономически обоснованный потенциал использования биомассы для электроэнергии, проанализировать экологические и экономические аспекты, а также разработать рекомендации для энергетической политики. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Изучить существующие научные исследования и опыт других стран по использованию биомассы.
2. Разработать методику оценки ресурсного потенциала биомассы с учётом региональных особенностей и агрохозяйственных характеристик.
3. Провести количественную оценку потенциальных источников биомассы в регионах Казахстана.
4. Оценить экологические эффекты (сокращение выбросов, утилизация отходов).
5. Выполнить экономическую оценку: стоимость производства энергии из биомассы, сравнение с тарифами на электроэнергию.
6. Провести сравнительный анализ с опытом ЕС, Китая, России и Узбекистана.
7. Сформулировать рекомендации для национальной энергетической политики и устойчивого развития.

2 Методология исследования

2.1 Метод оценки ресурсного потенциала

Количественная оценка биомассы проводится в два этапа: (1) расчёт массы доступной биомассы, (2) перевод массы в энергетический эквивалент. Для сельскохозяйственных культур используется формула расчёта собираемой сухой биомассы (CSB), предложенная в работе:

$$CSB = CP \times RF \times AF \times WF$$

где CP — производство культуры (т/год); RF — коэффициент соотношения соломы к зерну; AF — доля доступности для сбора; WF — коэффициент влажности (обычно 0,85).

Для животноводческих отходов потенциальная масса навоза оценивается на основе поголовья скота и среднесуточного выхода навоза; коэффициенты использования принимают 50 % для крупного рогатого скота, 40 % для лошадей, 30 % для овец и 25 % для птицы.

Энергетический потенциал расчётной массы биомассы определяется формулой:

$$E = A \times Y \times Q \times \eta \times 10^3 / 3,6,$$

где A — площадь посадки или количество биомассы (га или т), Y — урожайность (т/га), Q — низшая теплота сгорания (МДж/кг), η — коэффициент эффективности преобразования (0,25–0,35 для электроэнергии).

Эта формула используется для оценки энергии, производимой из плантаций павловнии и других энергокультур. Например, при урожайности павловнии 30 т/га·год и низшей теплоте 17 МДж/кг базовый сценарий на площади 5 000 га даёт 225 ГВт·ч в год [1].

2.2 Моделирование технологических процессов

Для исследования были использованы открытые базы данных Министерства энергетики Республики Казахстан, Агентства по статистике и аналитические данные MDPI [2]. Моделирование энергетических установок осуществлялось с применением программного обеспечения Aspen Plus, ANSYS Fluent, ChemCAD и других симуляторов для оценки пиролизных и газификационных процессов (приведённый в приложении список программ). Эти пакеты позволяют рассчитывать тепловые балансы, распределение продуктов и экономическую эффективность.

2.3 Сценарный анализ

Сценарный подход предполагает две линии развития: реалистичный (базовый) сценарий (сохраняет текущие объёмы сбора биомассы и ввод 5 000 га павловнии) и перспективный (идеализированный) (увеличение сборов до 50 % от доступной массы, расширение посадок павловнии до 15 000 га). Производство энергии оценивается до 2030 года; в перспективном сценарии возможно увеличение доли биомассы до 5 % в электроэнергетике.

3 Ресурсный потенциал биомассы в Казахстане

Теоретический ресурсный потенциал биомассы Казахстана оценивается в 466,74 ПДж/год (около 129 ТВт·ч/год), из которых 61,02 % обеспечивает животноводство, а 38,34 % — сельское хозяйство. В таблице 1 приведены данные по сельскохозяйственным культурам: общие объёмы производства и собираемая биомасса. Наибольший вклад даёт пшеница (63,3 %), затем ячмень (16,9 %), кукуруза (16,7 %).

Таблица 1 - Производство сельскохозяйственных культур и собираемая сухая биомасса

Культура	Производство, млн т	Коэффициент солома/зерно	Собираемая сухая масса, млн т
Пшеница	14,5	1,4	12,9
Ячмень	3,8	1,3	3,4
Кукуруза	1,8	1,5	2,7
Рис	0,34	1,5	0,5
Прочие	2,1	1,2	1,5
Итого	22,54	—	21,0

Для животноводческих отходов расчётная масса навоза (в пересчёте на сухую биомассу) приведена в таблице 2. Наибольший потенциал наблюдается у крупного рогатого скота (50 %), что связано с численностью и коэффициентом использования навоза.

Таблица 2 - Потенциал животноводческих отходов

Вид животного	Поголовье, млн голов	Суточный выход навоза, кг/голова	Доля сухого вещества	Потенциальный сбор сухой массы, млн т/год
Крупный рогатый скот	7,5	30	20 %	8,38
Лошади	3,3	20	20 %	3,76
Овцы и козы	13,2	1,5	25 %	2,66
Птица	46,0	0,3	25 %	1,96
Всего	—	—	—	16,76

С учётом указанных источников ресурсный потенциал (при коэффициенте использования 50 %) составляет около 45 900 т/сут, что эквивалентно $45,9 \text{ тыс. т} \times 365 = 16,7 \text{ млн т/год}$.

4 Вклад энергокультур в выработку электроэнергии

Среди энергокультур особое внимание уделяется павловнии — быстрорастущему дереву, способному достигать урожайности 30–40 т/га·год, фиксировать до 67,8 т CO₂-экв/га и восстанавливаться после срезки. В оптимальных условиях одно дерево может давать энергетическую ценность 388 900 кВт·ч/га при пиролизе. Выращивание павловнии в регионах с благоприятным климатом (Южный Казахстан, Жетысу, Туркестан) позволит уменьшить давление на древесные ресурсы и диверсифицировать биомассовые источники.

4.1 Экологические аспекты

Использование биомассы способствует снижению выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ. Сжигание соломы в полях приводит к выбросам частицы, оксидов азота, серы, летучих органических соединений и диоксинов. Переработка сельхоз-остатков в биоэнергию позволяет предотвратить неконтролируемые пожары и образование метана при разложении, поскольку сжигание соломы «в земле» формирует 2,5–4,5 раза больше метана, чем контролируемая переработка. Пиролиз позволяет получить биоуголь, который может быть возвращён в почву для увеличения её плодородия и связывания углерода. При медленном пиролизе образуется 35–50 % биоугля и 30–50 % жидких продуктов, что обеспечивает значительный потенциал фиксации углерода [3][4].

Плнтации павловнии дополнительно способствуют абсорбции CO₂: одно насаждение способно поглощать около 67,8 т CO₂-экв/га в год; в рамках перспективного сценария (15 000 га) это приводит к ежегодному поглощению ~1 млн т CO₂. Эта величина сопоставима с выбросами небольших угольных ТЭЦ. Кроме того, развитие биоэнергетики уменьшает нагрузку на полигоны твёрдых бытовых отходов: на сегодняшний день в Казахстане образуется около 5,5 млн т твёрдых отходов, из которых лишь 9 % перерабатывается.

4.2 Экономические аспекты

Стоимость производства электроэнергии из биомассы зависит от вида сырья, выбранной технологии и масштаба производства. Для оценки экономической эффективности использованы данные о тарифах на электроэнергию: в декабре 2024 года для населения тариф составлял 29,41 тенге/кВт·ч, для промышленности — 36,43 тенге/кВт·ч. При консервативном сценарии (использование отходов без выращивания энергокультур) себестоимость электроэнергии из биомассы оценивается на уровне 25–30 тенге/кВт·ч, что близко к действующим тарифам. При перспективном сценарии (включающем посадку павловнии и строительство крупных пиролизных установок) себестоимость может снизиться до 20–25 тенге/кВт·ч благодаря высокой урожайности и продажам сопутствующих продуктов (био-масла, биоугля).

Сравнительный анализ «реалистичного» и «идеализированного» сценарии для павловнии показан на рисунке 3. В базовом варианте (5 000 га) производство электроэнергии составляет 225 ГВт·ч/год, в перспективном (15 000 га) — 675 ГВт·ч/год. Разница в сценариях демонстрирует, как наращивание плантаций и повышение эффективности преобразования позволяет увеличить вклад павловнии в энергобаланс.

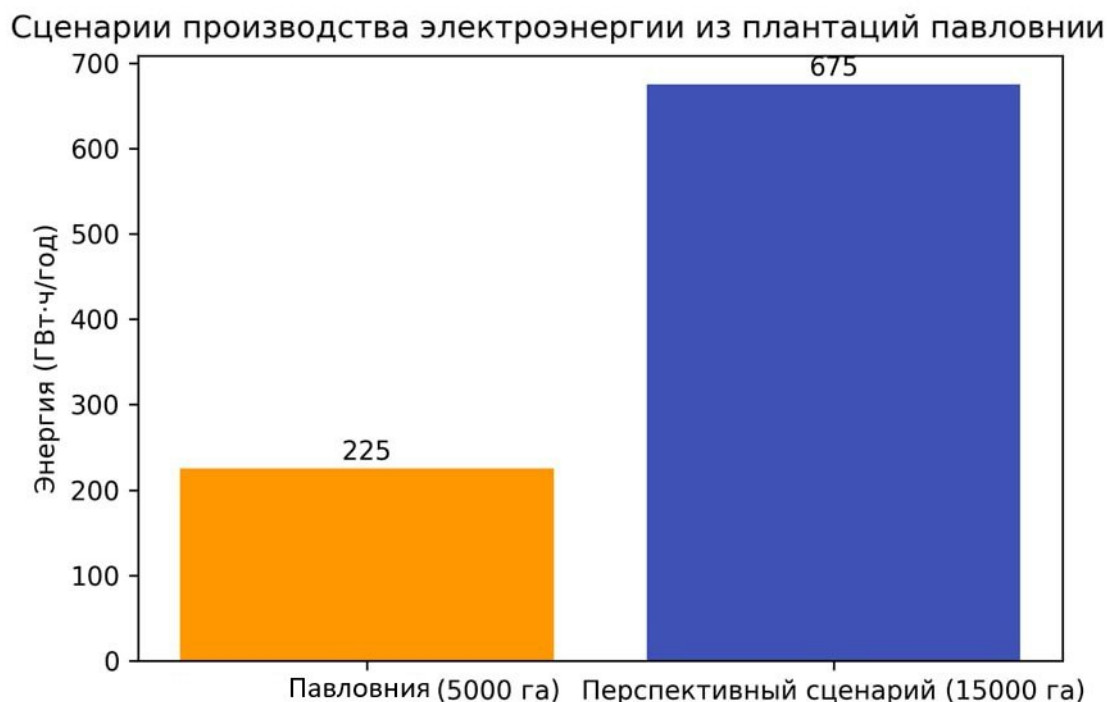


Рисунок 1 – Сравнительный сценарий

Окупаемость инвестиций зависит от капитальных затрат на строительство биоэнергетических установок. По данным открытых проектов, строительство мегаваттной биогазовой станции стоит 1,2–1,5 млн долларов США, срок окупаемости — 7–10 лет при стабильном поставке сырья. Государственные субсидии, льготные кредиты и зелёные тарифы могут ускорить окупаемость. Важную роль играет рынок сопутствующих продуктов: био-масло может быть использовано как сырьё для химической промышленности, биоуголь — как удобрение и поглотитель углерода [5].

5 Сравнительный анализ международного опыта использования биотоплива

Европейский союз. Страны ЕС достигли значительных успехов в развитии биоэнергетики благодаря субсидиям и строгому регулированию. В Финляндии и Швеции биомасса используется на ТЭЦ, в Дании — для когенерации в сельских районах. Обязательные закупочные тарифы и налоги на углерод способствовали окупаемости инвестиций. Пример ЕС показывает важность нормативной поддержки и длинных контрактов на поставку биомассы.

Китай. В Китае действует государственная программа по переработке сельскохозяйственных отходов: ежегодно перерабатывается около 500 млн т биомассы, что позволяет заменить 130 млн т угля и создать более 400 тыс. рабочих мест. Значительные инвестиции (610 млрд юаней) обеспечили развитие крупных биоэнергетических станций. Китай сочетает пиролиз, биогаз и комбинированное производство тепла и электроэнергии, активно внедряя энергокультуры.

Россия. Технический потенциал биомассы в России составляет 431 ТВт·ч/год, но экономически реализуемый — 285 ТВт·ч; большая часть потенциала сосредоточена в северо-западных регионах. Основные сложности — отсутствие экономических стимулов и развитой инфраструктуры. Развитие биоэнергетики происходит в основном в лесной и целлюлозно-бумажной промышленности.

Узбекистан. В рамках стратегии «зелёной экономики» правительство планирует довести долю возобновляемых источников в генерации электроэнергии до 25 % к 2030 году и удвоить энергоэффективность. Опыт Узбекистана показывает, что даже страны с ограниченными ресурсами могут активно развивать биогазовые станции при поддержке международных финансовых организаций.

Для Казахстана эти примеры означают необходимость:

1. создания стабильной нормативной базы (зелёных тарифов, субсидий);
2. инвестирования в инфраструктуру сбора и переработки биомассы;
3. организации демонстрационных проектов для фермеров;
4. развития цепочки добавленной стоимости (биохимические продукты, удобрения).

Заключение

Исследование показало, что Казахстан обладает значительным потенциалом биомассы — более 466 ГДж/год, что может обеспечить до 5 % потребностей электроэнергии при эффективном использовании. Основными источниками являются сельскохозяйственные отходы и навоз крупного рогатого скота, птицы и отходы животноводства. Дополнительный потенциал обеспечивает агрокультура павловния, которая имеет хорошее воспроизведение.

Экологические преимущества включают сокращение выбросов парниковых газов, утилизацию отходов и повышение плодородия почв через применение биоугля.

Экономический анализ показывает, что при поддержке государства стоимость электроэнергии из биомассы может быть конкурентоспособной с другими видами альтернативных источников энергии. В международном опыте ключевыми факторами успеха являются субсидии, технологические инновации и кооперация с фермерами.

На основе проведённого анализа предлагаются следующие рекомендации:

Создание нормативной и правовой базы.

Разработать закон о биоэнергетике, включающий зелёные тарифы, льготы и стимулирование инвесторов.

Стимулирование фермеров.

Ввести субсидии на оборудование для сбора и переработки отходов, развивать кооперативы, объединяющие мелких сельхозпроизводителей.

Инвестиции в технологии.

Поддержатъ строительство биогазовых и пиролизных установок, создание демонстрационных площадок по выращиванию павловния и других энергокультур.

Научные исследования.

Финансировать исследования по созданию высокопроизводительных пиролизных установок.

Список литературы

1. Интернет вещей: Министерство энергетики Республики Казахстан. Энергетический обзор 2023 – URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/energo?lang=ru>
2. Остаточные ресурсы биомассы Казахстана. MDPI, 2022– URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/17/6482>
3. Pyrolysis: biochar and biofuel production. WSU Extension Energy Program — описание процессов медленного и быстрого пиролиза, распределения продуктов. 2016 – URL: <https://www.cambridge.org/core/books/abs/biochar/pyrolysis-a-sustainable-way-from-biomass-to-biofuels-and-biochar/A6B7CBD19A26E4E289B2832C228B61AF>
4. Бюро национальной статистики РК. Сельское хозяйство Казахстана 2022. – Астана: БНС, 2023. – URL: <https://stat.gov.kz/>
5. Basu P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. – 3rd ed. – Academic Press, 2018. – 582 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128129920>

ӘОЖ 621.311.019.3

ЖЫЛУ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРЫ ЖАБДЫҚТАРЫНЫҢ СЕНІМДІЛІГІ МЕН ПАЙДАЛАНУ ДАЙЫНДЫҒЫН БАҒАЛАУДЫҢ ЖАҢА САЛЫСТЫРМАЛЫ ЖҮЙЕСІ: АҚАУЛАР КЕСТЕСІН ТАЛДАУ

Ныгыманова А.С.*, Онгар Б., Сарсенбаев Е.А.

«Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КЕАҚ
(«Қ.И.Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ» КЕАҚ), Satbayev University), Алматы,
Қазақстан

E-mail: a.nygymanova@satbayev.university, b.ongar@satbayev.university,
y.sarsenbayev@satbayev.university,

Бұл мақалада жылу электр станцияларының (ЖЭС) жабдықтарын пайдалану дайындығын бағалау үшін құрылымдық сенімділік схемасын және ақаулар кестесін талдау үлгілері пайдаланылады. Талдау ЖЭС жүйелерінің өнімділігін өлшеу үшін сенімділікті де, қолжетімділікті де бағалайды.

Мұрағаттық жазбалардан алынған техникалық қызмет көрсету деректері ең қолайлы үлестіруді анықтау және оның параметрлерін бағалау үшін Колмогоров-Смирновқа (K-S) сәйкестік критерийін қолдана отырып талданады. Сонымен қатар, ішкі жүйенің сенімділігі әр түрлі уақыт аралығында есептеледі. Нәтижелер мәжбүрлі желдеткіш, көмір диірмені, генератордың май жүйесі, салқындатқыш су сорғысы және қазандықтың қоректендіру сорғысы қондырғының ең маңызды құрамдас бөлігі екенін көрсетеді. Орнатудың жалпы тиімділігін арттыру үшін осы жүйелердің сенімділігі мен қолжетімділігін арттыру бойынша мақсатты шаралар қабылданды.

Ақаулар кестесінің модельдері ЖЭС тиімділігін бағалауға арналған. Бұл модельдер станцияның ішкі жүйелері үшін қолданылады және қол жетімділік көрсеткіштері бағаланады. Жалпы қол жетімділік – 87,77%, Ақаулар кестесі моделі арқылы бағаланады. Талдау барысында салыстырмалы нәтижелер алынды, бұл құрылымдық сенімділік схемасының моделі сәтсіздік кестесінің үлгісімен салыстырғанда нақты уақыт деректеріне жақын жүйенің қолжетімділік көрсеткішін қамтамасыз ететінін көрсетті. Бұл жұмыстың жаңалығы оның интеграцияланған салыстырмалы жүйесінде жатыр, ол ақаулар кестесін сезімталдыққа негізделген техникалық қызмет көрсетудің басымдылығымен бірегей түрде біріктіреді және нақты зауыттық деректерге негізделген. Бұл тәсіл маңызды ішкі жүйелерді анықтауға, сондай-ақ модельдің дәлдігін сандық бағалауға және жылу электр станциясының өнімділігін оңтайлы арттыру үшін мақсатты техникалық қызмет көрсетуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: сенімділікті талдау, қол жетімділікті талдау, сезімталдықты талдау, жылу электр станциясы.

Кіріспе және жалпы мәліметтер

Жылу электр станциясы (ЖЭС) әдетте сериялық, параллель және аралас конфигурацияға біріктірілген бірнеше жүйелерді қамтиды. Электр станцияларының жоғары өнімділігі әр түрлі қолданылатын компоненттердің/ішкі жүйелердің сенімділігі мен қол жетімділігіне байланысты. Қазіргі уақытта көмір ЖЭС-лары электр энергиясын өндірудің негізгі көзі болып табылады. ЖЭС-те қолданылатын жабдық станцияның жалпы пайдалану дайындығын арттыру үшін сенімді және үнемді болуы керек. Жалпы операциялық дайындықтың төмендеуі болып табылады оған жоспардан тыс және жоспарланған техникалық қызмет көрсету шаралары әсер етеді. Дұрыс емес техникалық қызмет көрсету жөндеу уақытының ұлғаюына немесе жүйелердің сенімділігінің төмендеуіне әкеледі [1-3].

Әдетте, мұндай жүйелер істен шығу мүмкіндігін азайту үшін профилактикалық қызмет көрсетеді. Сондықтан техникалық қызмет көрсету кестесі жоспарланбаған өшірулерді азайтуда және сол арқылы станцияның өнімділігін арттыруда маңызды рөл атқаратын маңызды тәсілдердің бірі болып табылады. Техникалық қызмет көрсетуді дұрыс жоспарлау ЖЭС-тің техникалық қызмет көрсету қажеттіліктерін минималды бағамен анықтау үшін қолданылады.

Соңғы жылдары ЖЭС сенімділігі мен қолжетімділігін арттыру ғалымдардың зерттеулерінің негізгі бағытына айналды [4, 5]. Сенімділік пен қол жетімділікті бағалау үшін қолданылатын ең көп таралған әдістер – ақаулар кестесін талдау әдісі, функционалды талдау, құрылымдық сенімділік схемасы, Марков модельдері, Монте-Карло әдісі.

ЖЭС ішкі жүйесі түтін газдары мен ауа жүйесінен, бу шығару жүйесінен, турбиналық ішкі жүйеден, қазандық ішкі жүйесінен, пешке ауа беру циклінен, су айналымының ішкі жүйесінен, көмірді өңдеуге арналған қондырғылардан тұрады. Резервтеу тұжырымдамасы сенімділікті, сондай-ақ ЖЭС-тің маңызды жүйелерінің, яғни ішкі жүйелерінің, компоненттерінің қол жетімділігін арттыру үшін қолданылады. Әдетте, ол анықталған маңызды жүйелерге үлкен сенімділік береді.

Жабдықтар сипаттамасы

Жылу электр станциясы дәстүрлі 500 МВт бу циклінің конфигурациясын пайдаланады, бұл аймақтағы жылу энергиясын өндірудің әдеттегі ауқымды технологиясы. Оның негізгі жүйелеріне энергияны түрлендіру үшін турбогенератор қондырғысына қосылған 540°C температурада және 170 бар қысымда бу шығаратын жоғары тиімді су құбырлы қазандығы кіреді. Мембраналық қабырғалы қазандық пеші жылу сәулеленуін тиімді сіңіреді, ал түтін газдары қос электростатикалық сүзгілерге кірмес бұрын жылуды қалпына келтіру үшін айналмалы ауа жылытқыштары арқылы өтеді. Мұндай интеграцияланған дизайн пайдалану және экологиялық талаптарды ескере отырып, электр энергиясын тиімді өндіруді қамтамасыз етеді. Ағымдағы техникалық қызмет көрсету стратегиялары дәстүрлі уақытқа негізделген кестелерге негізделген, бұл зерттеу сенімділікке бағытталған тәсілдер арқылы жақсартуға арналған. Атап айтқанда, станцияның нақты жұмыс деректеріне қатысты сенімділік блок-схемасы мен ақаулар кестесін талдау әдістері арқылы болжау дәлдігін салыстыруға бағытталған. Бұл эмпирикалық тәсіл қолданыстағы әдебиеттердегі айтарлықтай олқылықты жояды, ол көбінесе жеткілікті тексерусіз теориялық модельдерге негізделген.

Осы зерттеуде қабылданған әдістеме талдаудың үш бөлек кезеңін қамтиды. Біріншіден, компоненттердің сенімділігін талдау – тарихи техникалық қызмет көрсету деректері бойынша Вейбуллдың таралуын модельдеуді қолдана отырып, сәтсіздік заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік береді. Екіншіден, жүйелік деңгейдегі қол жетімділікті модельдеу орнатудың жалпы өнімділігін болжау үшін ақаулар кестесі әдісін қолданады. Және, сезімталдықты талдау сенімділігі жүйенің қол жетімділігіне айтарлықтай әсер ететін маңызды компоненттерді анықтауға мүмкіндік береді, бұл техникалық қызмет көрсетуді мақсатты түрде оңтайландыруға мүмкіндік береді.

ЖЭС сенімділігін талдау

Сенімділікті талдау параметрлерді бағалаумен, модельдеумен және жүйенің белгілі уақыт аралығында қанағаттанарлық жұмыс істеу ықтималдығын бағалаумен байланысты. Қалыпты үлестіру жағдайында 1-теңдеу тығыздық

функциясын бағалау үшін, ал 2-теңдеу сенімділікті бағалау үшін қолданылады. Сол сияқты, Вейбуллы бөлу үшін сенімділік (3) теңдеуімен бағаланады.

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1)$$

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad (3)$$

Деректер жиынтығына сәтсіздіктер арасындағы уақытты және жөндеуге дейінгі уақытты көрсететін компоненттерді, ішкі жүйелерді, яғни ЖЭС жүйелерін жөндеу жазбалары кірді. Талдауда Колмогоров-Смирновтың (К-S) сәйкестік критерийі ақаулар деректерінің әртүрлі теориялық ықтималдық үлестірімдеріне, соның ішінде вейбуллға, логнормальды, экспоненциалды және қалыпты үлестірімдерге қаншалықты сәйкес келетінін бағалау үшін пайдаланылды. Осы талдау арқылы бақыланатын сәтсіздік заңдылықтарын дәл көрсететін ең қолайлы статистикалық модельді анықтау мақсатында оңтайлы үлестіру параметрлері анықталады [6]. К-S сәйкестік критерийі ЖЭС ақаулық деректерінің қалыпты үлестірімі бар популяциядан таралуға қаншалықты сәйкес келетінін анықтайды. ЖЭС ішкі жүйесінің бірнеше теориялық үлестірімдері 1 кестеде келтірілген.

1-кесте. ЖЭС ішкі жүйесінің тиімді таралуы

Жабдықта р	Тест К-S							Параметрл ер
	Мыс ал 1Р	Мыс ал 2Р	Лога- рифм	Тұрақ ты	Вейбу лл 2Р	Вейбу лл 3Р	Ең жақсы таралу	
Қазандық барабаны	95.5 6	76.0 6	1.806 7	1.377	1.574	12.06	қалыпты 2Р	$\mu = 19322.1$ $\sigma = 5859.22$
Қазандық құбырлары	84.7 8	22.8 3	0.578 7	0.316e -4	0.10e- 4	0.55e- 4	Вейбулл- 2Р	$\beta=2.61432$ $\theta=19371.3$
Отын жағу жүйесі	95.5 6	76.0 6	1.806 7	1.377	1.574	12.06	қалыпты 2Р	$\mu=19322.1$ $\sigma=5859.22$
Бу қыздырғы ш	95.5 6	76.0 6	1.806 7	1.377	1.574	12.06	қалыпты 2Р	$\mu=19322.1$ $\sigma=5859.22$
Экономайз ер	95.5 6	76.0 6	1.806 7	1.377	1.574	12.06	қалыпты 2Р	$\mu=19322.1$ $\sigma=5859.22$
Жылытқы ш	95.5 6	76.0 6	1.806 7	1.377	1.574	12.06	қалыпты 2Р	$\mu=19322.1$ $\sigma=5859.22$

Әр түрлі уақыт аралығындағы ішкі жүйенің сенімділігі келесі 2 кестеде көрсетілген.

2-кесте. ЖЭС ішкі жүйесінің сенімділік талдауы

Жабдықтар уақыт	Сенімділік (%) уақыт моментінде (сағат)								
	720	2160	4320	6480	8760	10800	12960	15120	17520
Қазандық барабаны	0.999 2	0.998 3	0.994 7	0.985 8	0.964 2	0.927 0	0.861 2	0.763 3	0.620 7
Қазандық күбырлары	0.999 8	0.996 7	0.980 4	0.944 4	0.881 9	0.804 8	0.704 9	0.592 6	0.463 4
Отын жағу жүйесі	0.999 2	0.998 3	0.994 7	0.985 8	0.964 2	0.927 0	0.861 2	0.763 3	0.620 7
Бу қыздырғыш	0.999 2	0.998 3	0.994 7	0.985 8	0.964 2	0.927 0	0.861 2	0.763 3	0.620 7
Экономайзер	0.999 2	0.998 3	0.994 7	0.985 8	0.964 2	0.927 0	0.861 2	0.763 3	0.620 7
Жылытқыш	0.999 2	0.998 3	0.994 7	0.985 8	0.964 2	0.927 0	0.861 2	0.763 3	0.620 7

Сенімділік тұрғысынан жылу электр станциялары жүйелерінің сезімталдығын талдау. Сенімділікке бағытталған қол жетімділікті бағалау сәтсіздік динамикасын бағалауды және маңызды компоненттерді жөндеуді талап етеді. Бұл талдау жүйенің өнімділігінің негізгі жабдықтағы ақаулық жиілігінің (λ) және жөндеу жиілігінің (μ) өзгеруіне сезімталдығын жүйелі түрде зерттейді. Талдау осы параметрлердің қондырғының жалпы жұмысына қалай әсер ететінін сандық түрде анықтайды, сенімділіктің жоғарылауына әкелетін компоненттерді анықтайды. Сезімталдықты талдау компоненттердің істен шығу жиілігі мен жөндеу жиілігінің өзгеруі жүйенің сенімділігіне қалай әсер ететінін бағалайды. Жылу электр станциялары (ЖЭС) үшін бұл техникалық қызмет көрсетудің басымдылығын анықтауға және пайдалану дайындығын оңтайландыруға көмектеседі [7].

$R(t)$ ақаулық жиілігіне (λ) және жөндеу жиілігіне (μ) сенімділік сезімталдығы ішінара туындыларды қолдану арқылы есептеледі:

а) сенімділік функциясы (Weibull):

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\theta} \right)^{\beta} \right] \quad (4)$$

мұндағы θ = масштаб параметрі, β = пішін параметрі.

б) істен шығу жылдамдығына сезімталдық (λ):

$$\frac{\partial R(t)}{\partial \lambda} = -t \times R(t) \times \left(\frac{\beta}{\theta} \right) \times \left(\frac{t}{\theta} \right)^{\beta-1} \quad (5)$$

в) жөндеу жылдамдығына сезімталдық (μ):

$$\frac{\partial R(t)}{\partial \mu} = t \times R(t) \times \left(\frac{\beta}{\theta}\right) \times \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \times \left(\frac{1}{\mu^2}\right) \quad (6)$$

г) жүйенің сенімділігі (дәйекті конфигурация): Сериялық жүйе үшін жалпы сенімділік жеке сенімділіктің нәтижесі болып табылады

$$Rs(t) = \sum_{i=1}^n Ri(t) \quad (7)$$

Жүйенің p параметріне сенімділігінің сезімталдығы (мысалы, λ немесе μ):

$$\frac{\partial Rs(t)}{\partial p} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial Ri(t)}{\partial p} \times (Rj(t)), \quad (j \neq i) \quad (8)$$

Қазандықтың жану жүйесінің сезімталдығын талдау

8760 сағаттан кейін BFS үшін сезімталдықты талдау нәтижелері 3-кестеде келтірілген. BFS жүйесінде қазандық құбырлары ең жоғары сезімталдыққа ие ($\Delta R/\Delta \lambda = -0,0014$), өйткені термоциклден пайда болатын сойылдың істен шығуы ($\beta=2,1$). Басқа компоненттер (мысалы, бу қыздырғыш, экономайзер) бірдей істен шығу жылдамдығына ие ($\lambda \approx 0,00004528/\text{сағ}$), олардың қалыпты таратылған ақаулары бірдей сезімталдыққа әкеледі. МТТФ қазандығының құбырларының β -ге сезімталдығы ($\Delta \text{МТТФ}/\Delta \beta = -1420,8$) микросызаттардың таралуын болдырмау үшін материалдарды (мысалы, хром-молибден болаттары) жаңарту қажеттілігін көрсетеді. Жанармай жағу жүйесі, механикалық күрделілігіне қарамастан, оттықтардың артық дизайны мен жоғары жөндеу жылдамдығына байланысты төмен сезімталдыққа ие ($\mu = 0,0081967/\text{сағ}$). Бұл ішкі жүйенің сенімділігін құбырлардағы ағып кетуді анықтаудың автоматтандырылған жүйелері және жылу жүктемелерін азайту үшін күйе Үрлеудің оңтайландырылған циклдары арқылы одан әрі жақсартуға болады.

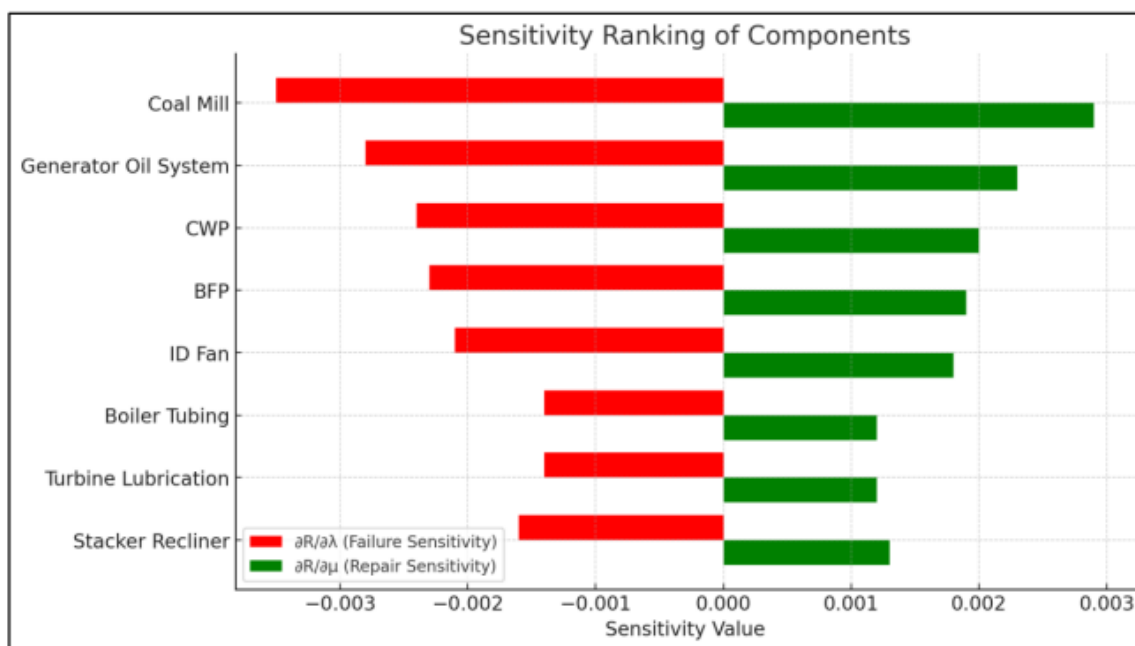
3-кесте. $t=8760$ сағат кезінде сезімталдықты көрсетуі

Жабдықтар	λ (сағ)	μ (сағ)	$\partial R/\partial \lambda$	$\partial R/\partial \mu$	Сенімділік ($\partial \text{МТТФ}/\partial \theta$)	Сезімталдық ($\partial \text{МТТФ}/\partial \beta$)
Қазандық барабаны	0.00004528	0.0040439	-0.0012	0.0010	1.000	-
Қазандық құбырлары	0.00005178	0.0123839	-0.0014	0.0012	0.901	-1420.8
Отын жағу жүйесі	0.00004528	0.0081967	-0.0012	0.0010	1.000	-
Бу қыздырғыш	0.00004528	0.0039705	-0.0012	0.0010	1.000	-
Экономайзер	0.00004528	0.0040092	-0.0012	0.0010	1.000	-
Жылытқыш	0.00004528	0.0039041	-0.0012	0.0010	1.000	-

ЖЭС ішкі жүйелерін салыстырмалы талдау

Салыстырмалы сезімталдық рейтингі 1-суретте көрсетілгендей әр түрлі ішкі жүйелердегі компоненттердің сыни иерархиясын көрсетеді. Көмір диірмені Сенімділіктің ең жоғары сезімталдығын көрсетеді ($\Delta r/\Delta \lambda = -0,0035$), бұл екінші орын алатын генератор майы жүйесінен шамамен 25% жоғары және $-0,0028$ құрайды. Бұл артықшылық көмір диірменінің абразивті тозуға ($\beta = 1,8$) осалдығын және жоғары базалық істен шығу жылдамдығын ($\lambda = 0,00017108/\text{сағ}$) көрсетеді, бұл оны бүкіл кәсіпорынның сенімділігін арттырудың негізгі факторы етеді. Салқындатқыш су сорғысы мен қазандықтың қоректендіргіш сорғысы қайталама критикалық деңгейді құрайды ($-0,0024$ -тен $-0,0023$ -ке дейін), мұнда кавитация ($\beta = 0,58$) және жоғары қысымды шаршау ($\beta = 0,7$) олардың сезімталдығын анықтайды. Бір қызығы, желдеткіш λ мәнінің төмендігіне қарамастан бесінші орында тұр, өйткені оның жұмыс істемеу үрдісі ($\beta = 0,36$) параметрлерге сезімталдықты күшейтеді – бұл құбылыс оның mttf-тен β -ге өте сезімталдығымен анықталады ($\Delta \text{MTTF}/\Delta \beta = -4521,3$).

$0,0012$ – $0,0029$ шегінде $\partial R/\partial \mu$ мәндерін топтастыру жөндеу жылдамдығының жоғарылауы барлық компоненттер үшін жалпы пропорционалды артықшылықтар беретіндігін көрсетеді, дегенмен көмір диірменінің $\partial R/\partial \mu$ ($0,0029$) жоғары мәні техникалық қызмет көрсету шаралары 140%-ға сенімділіктің жоғарылауын қамтамасыз етеді деп болжайды. Турбинаны майлау жүйесімен салыстырғанда бірлігі ($0,0012$). Бұл рейтинг жанармай және сұйықтық жүйелері сенімділікке үлкен қауіп төндіретін жұмыс тәжірибесін эмпирикалық түрде растайды, ал қазандық құбырлары сияқты құрылымдық элементтер қауіпсіздік тұрғысынан маңызды рөліне қарамастан тұрақты сезімталдық профильдерін көрсетеді.



Сурет 1. – Компоненттердің сезімталдығы бойынша рейтингі

Маңызды компоненттерге қолдану

Бұл талдау жылу электр станциясының (ЖЭС) негізгі жабдықтарының, соның ішінде мәжбүрлі желдеткіштің, көмір диірменінің, генератордың май жүйесінің, салқындатқыш су сорғысының және қазандықтың қуат сорғысының сенімділігін бағалайды. Ықтималдықтың ең дәл үлестірілуінен алынған сенімділік деректерін пайдалана отырып, талдау жұмыс уақытының 720-дан 17 520 сағатқа дейінгі аралықтарында істен шығу жиілігін (λ) және жөндеу жиілігін (μ) бағалайды. Нәтижелер техникалық қызмет көрсетуді оңтайландырудың басым бағыттарын анықтай отырып, әрбір компоненттің жүйенің жалпы қолжетімділігіне салыстырмалы әсерін сандық түрде көрсетеді [8].

Мәжбүрлі желдеткіш үшін:

а) Параметрлер: $\beta=0,35967$, $\theta=12372,54$, $\gamma=10,78$.

б) $t=8760$ кезіндегі сенімділік $R(8760)=0,4136$ құрайды.

с) λ сезімталдығы:

$$R(8760) = \exp \left[- \left(\frac{8760}{12372,54} \right)^{0,35967} \right] = 0,4136$$
$$\frac{\partial R}{\partial \lambda} = -8760 \times 0,4136 \times \left(\frac{0,35967}{12372,54} \right) \times \left(\frac{8760}{12372,54} \right)^{-0,64033} = -0,0021$$

Жылу электр станциясының барлық ішкі жүйелері үшін жүргізілген сезімталдықты талдау техникалық қызмет көрсету стратегияларын оңтайландыру, компоненттердің сенімділігін арттыру және максималды пайдалану дайындығы үшін пайдалы ақпарат алуға мүмкіндік береді. Нәтижелер компоненттердің сезімталдығындағы, істен шығу механизмдеріндегі және жөндеуге тәуелділіктегі әртүрлі заңдылықтарды анықтайды, олар мақсатты араласудың негізі болуы керек.

Нәтиже және талқылау

Бұл жұмыс техникалық қызмет көрсету жазбаларын жүйелі талдау негізінде жылу электр станцияларының (ЖЭС) пайдалану дайындығын бағалайды.

Жүйеге тән күрделілікті ескере отырып, бағалау алты негізгі ішкі жүйеге бағытталған:

- 1) қазандықтағы ауа айналымы,
- 2) көмір беру,
- 3) қазандық оттығы,
- 4) турбогенератор қондырғысы,
- 5) конденсатор жүйесі
- 6) су айналымы жүйесі.

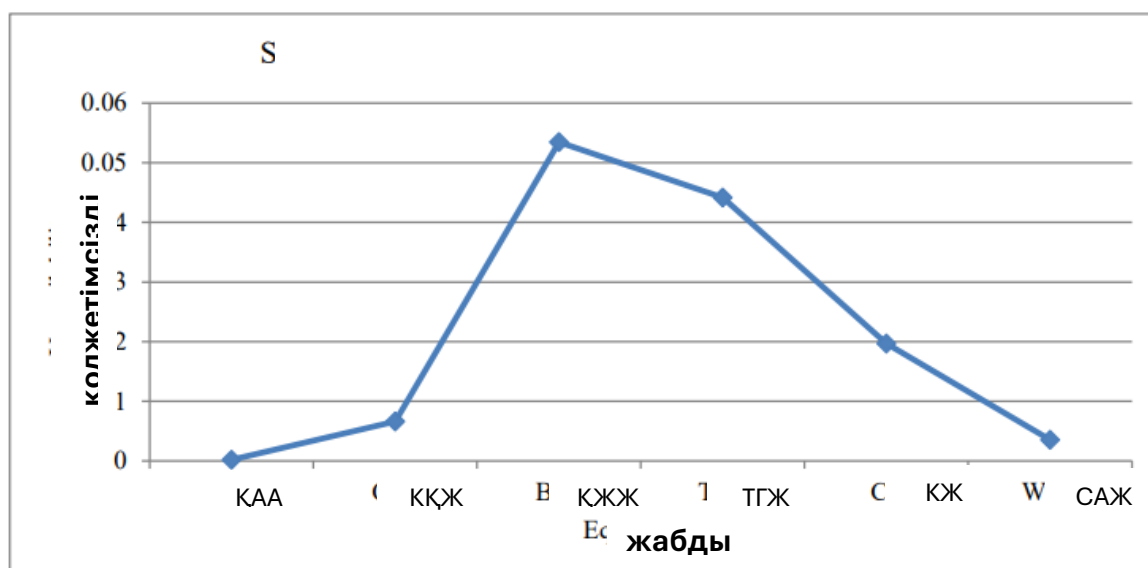
Талдау әдістемесі осы маңызды ішкі жүйелердегі қол жетімділік көрсеткіштерін де, сәтсіздік ықтималдығын да сандық бағалау үшін сенімділік және ақаулар кестесін талдауды біріктіреді. Осы ішкі жүйелер үшін қол жетімділік көрсеткіштері келесі суреттерде келтірілген, олардың жұмыс сенімділігін егжей-тегжейлі салыстыру көрсетілген.



Сурет 2. – ЖЭС ішкі жүйелерінің қол жетімділік индексі

Барлық ішкі жүйелер арасында ең төменгі қол жетімділікке ие болды (94,66%). Қазандық барабаны (98,89%), бу қыздырғыш (98,87%) және қайта қыздырғыш (98,85%) сияқты маңызды компоненттер жоғары жылу жүктемесі мен коррозия қаупіне байланысты қол жетімсіздіктің негізгі себептері болды. Керісінше, құбырлар, қазандық (99,58%) және жүйесі отын жағудың (99,45%) үздік нәтижелер көрсетті, деп айғақтайды материалдардың сапасы мен бақылау жану маңызды рөл атқарады және сенімділік [9].

3-суретте ақаулар кестесін талдау моделі арқылы бағаланған ЖЭС ішіндегі ішкі жүйелердің қол жетімсіздігінің салыстырмалы талдауы берілген.



Сурет 3. – Ақаулар кестесін талдау моделіне негізделген қол жетімділік индексі туралы жиынтық ақпарат

Ақаулар кестесін талдау нәтижелері сәтсіздік жолдарын зерттеу арқылы жүйенің сенімділігі туралы қосымша ақпарат алуға мүмкіндік береді. Ақаулар кестесін талдау арқылы алынған қол жетімділік мәндері барлық ішкі жүйелер үшін айырмашылықтар 0,1%-дан аз. Мұндай конвергенция әдістеменің дұрыстығын растайды және сенімділікті бағалауды арттырады.

Проблемалық ішкі жүйелер үшін ақаулар кестесін талдау нәтижелері (сәйкесінше 94,66%) ақаулық механизмдері туралы қосымша түсінік береді. Ақаулар кестесін талдауда бұл жүйелердің қол жетімсіздігінің біршама жоғары деңгейі жалпы себептерге байланысты сәтсіздіктер немесе тәуелді оқиғалар осы күрделі ішкі жүйелерде маңызды рөл атқаруы мүмкін екенін көрсетеді. Турбинаны басқару жүйесінің осалдығы осы талдауда айқын көрінеді, бұл оны сенімділікті арттырудың маңызды бағыты ретінде көрсетеді [10].

Ақаулар кестесін талдау моделін қолданатын жылу электр станциясының энергия блогының жалпы дайындығы 0,877740 (87,77%) құрайды. Сенімділік блок-схемасын және ақаулар кестесін талдауды қолдана отырып, жылу электр станциясының (ЖЭС) пайдалану дайындығын талдау оның ішкі жүйелерінің сенімділігі туралы маңызды ақпарат алуға мүмкіндік берді. Сенімділік блок-схемасының моделі зауыттың жалпы дайындығын 87,72% деп бағалады, бұл ақаулар кестесін талдау нәтижесіне 87,77% сәйкес келеді, бұл екі әдіс арасындағы ақылға қонымды сәйкестікті көрсетеді. Алайда, ақаулар кестесін талдау тәуелсіз сәтсіздіктерді ескере отырып, қол жетімсіздікті асыра бағалайды. Ішкі жүйелер арасында қазандықтағы ауа айналымы (ҚАА) және су айналымы жүйелері (САЖ) ең жоғары дайындықты көрсетті (>99%), бұл желдеткіштер мен сорғылар сияқты резервтік компоненттердің болуымен түсіндіріледі. Керісінше, қазандықты жағу жүйесі (ҚЖЖ) және турбогенератор жүйесі (ТГЖ) ең төменгі өнімділікке ие болды (сәйкесінше ~94,66% және ~95,58%), негізінен қазандық барабаны, бу жылытқышы және турбинаны басқару жүйесі сияқты маңызды компоненттерге байланысты, олар жиі істен шығуға бейім. Көмірмен қамтамасыз ету жүйесі (КҚЖ) орташа сенімділікті көрсетті (~99,34%), көмір зауыттары ең әлсіз буын болды.

Қорытынды

Бұл талдау электр станцияларының сенімділігін жобалау теориясына да, тәжірибесіне де айтарлықтай үлес қосады. Қатаң аналитикалық әдістерді техникалық қызмет көрсетудің практикалық тұжырымдарымен үйлестіре отырып, зерттеу жылу электр станцияларының өнімділігі мен тиімділігін арттыруға кешенді тәсілді ұсынады. Нәтижелер электр энергиясының тұрақты өндірілуін қамтамасыз ету үшін құрамдас деңгейдегі сенімділікті талдаудың маңыздылығын көрсетеді, ал әдістеме әртүрлі өнеркәсіптік жағдайларға бейімделуі мүмкін сенімділікті бағалау үлгісін ұсынады.

Пайдаланылган деректер тізімі

[1] D.Adhikary, G.Bose, S.Chattopadhyay, D.Bose, and S.Mitra, “RAM investigation of coal-fired thermal power plants: A case study,” *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, vol. 3, Apr. 2012, doi: 10.5267/j.ijiec.2011.12.003.

[2] N.Al Balushi, S.M.Rizwan, S.Z.Taj, and W.Al Khairi, “Reliability analysis of power transformers of a power distribution company,” *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, vol. 15, no. 5, pp. 1735–1742, May 2024, <https://doi.org/10.1007/s13198-023-02042-8>

[3] S.Bisanovic, M.Hajro, and M.Samardzic, “Component Criticality Importance Measures in Thermal Power Plants Design,” *Int. J. of Ele., Electronic Com. Sci.* vol. 7, no. 3, 2013 pp-337-342.

[4] E.Zio and L.Podofillini, “Importance measures and genetic algorithms for designing a risk-informed optimally balanced system,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 92, no. 10, pp. 1435–1447, Oct. 2007, <https://doi.org/10.1016/j.res.2006.09.011>

[5] N.K.Jyotish, L.K.Singh, and C.Kumar, “Availability analysis of safety-critical systems of nuclear power plant using ordinary differential equations and reachability graph,” *Prog. Nucl. Energy*, vol. 159, p. 104624, May 2023, <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104624>

[6] K.Ji, I.Choi, and J.Won, “Reliability analysis-based life cycle assessment of railway components using long-term maintenance data,” *Dev. Built Environ.*, vol. 21, p. 100629, Mar. 2025, <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2025.100629>

[7] S.Jose M.Andrade, P.Pinheiro, G.Narciso, J.Neto, J.Bandeira, V.Andrade, C.Moraes, “Prioritising Maintenance Work Orders in a Thermal Power Plant: A Multicriteria Model Application,” *Sustainability*, vol. 15, no. 1, 2023, <https://doi.org/10.3390/su15010054>

[8] Китушин В.Г. Надежность энергетических систем: учебное пособие. – М.: Высш.ш, 2012. - 256 с.

[9] Ноздренко Г.В., Зыков В.В. Надежность теплооборудования ТЭС: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1996. – 72 с.

[10] Гладышев Г.П., Аминов Р.З., Гуревия В.З. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС: учебное пособие. – М.: Высш.шк., 2014. – 303 с.

ҚАЗБА ОТЫННЫҢ ҚОЛЖЕТІМДІ ЖАҒДАЙЫНДА ҚАЗАҚСТАНДА ЖАҢАРТЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯ КӨЗДЕРІН ИНТЕГРАЦИЯЛАУДАҒЫ ҚИЫНДЫҚТАР

Қанатбаева Г.Ж.*, Расмухаметова А.С.

КЕАҚ «Алматы энергетика және байланыс университеті», Қазақстан, Алматы
g.kanatbayeva@aues.kz

Андатпа: Мақалада Қазақстанда жаңартылатын энергия көздерін (ЖЭК) кеңінен енгізуге кедергі болатын негізгі факторлар қарастырылып, жан-жақты талданып, мұнай, газ, көмір сияқты қазба отындарының қолжетімділігі мен экономикалық маңыздылығы осы кедергілерді қалай күшейтетіні қарастырылады. Әлемдегі бірқатар дамыған елдер, әсіресе Еуропа мен Азия елдері, жаңартылатын энергия көздеріне басымдық беріп, үлкен қадамдар жасап жатыр. Осы елдермен салыстырғанда, Қазақстандағы ЖЭК-тің даму әлеуетін салыстыру.

Кілттік сөздер: жаңартылатын энергия көздері (ЖЭК), қазба отын, мұнай, газ, көмір, энергия, Қазақстан энергетикасы, күн энергиясы, жел энергиясы, ЖЭК интеграциясы.

1. Кіріспе

Қазақстан табиғи ресурстарға бай ел, оның ішінде көмір, мұнай және газ қоры үлкен екені бүгінгі күні шартарапқа белгілі. Айта кету керек, Қазақстанның экономикасы қазба отындарын өндіру мен экспорттауға бағытталған. Қазақстан әлемде қазба байлықтар қорынан әлемде мынадай орын алады (186 елдің ішінде):

Вольфрам, қорғасын, барий қорынан 1-ші орын, хромит, күміс және мырыштан 2-ші орын, марганец қорынан 3-ші орын, мыс мөлшерінен 4-ші орын, уран рудаларынан 5-ші орын, алтыннан 6-шы орын, темір рудаларынан 7-ші орын, қалайы мен никельден 8-ші орын, көмір, газ қорынан 9-шы орын, мұнай қорынан 13-ші орын алып отыр. Бұл – ғаламат байлық.

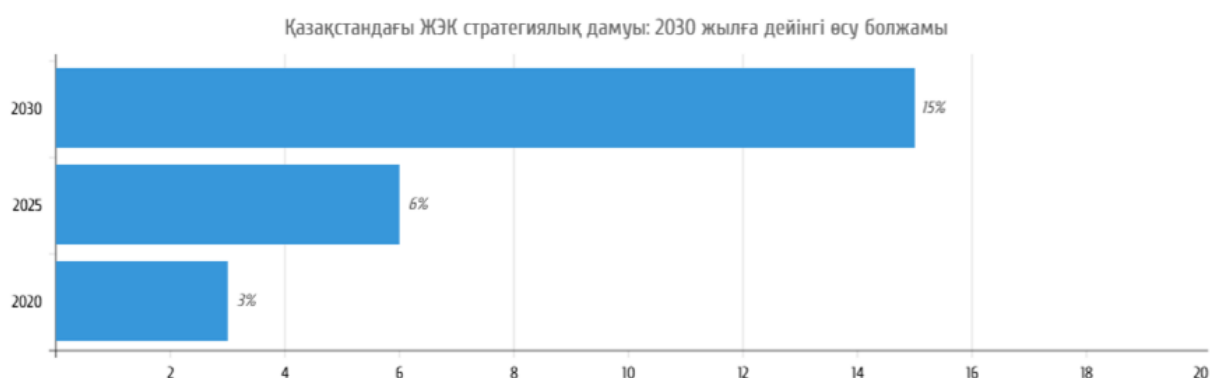
Каспий жағасындағы құрлықта 2,2 миллиард тонна, ал су астында (шельф) 4,5 миллиард тонна мұнай қоры жатыр. Арал аймағындағы мұнай қоры – 350 миллион тонна. Көмір қоры 200 миллиард тоннадан асады. Қазақстандағы уран қоры – 900 мың тонна, әлемдік қоры – 3,5 миллион тонна, демек, әлемдегі уранның төрттен бірі – бізде.

Қазір табылған, ашылған, қазба байлықтың барлық құны – 3,7 триллион АҚШ доллары болады екен. Геологтардың есебінше, барлық болжамды қазына, байлықтан 10 триллион АҚШ долларына тең.

Кесте 1 – Қазақстандағы қазба отындарының негізгі шоғырланған аймақтары (оның ішінде мұнай, көмір және газ).

№	Отын түрі	Аймақ	Негізгі кен орындары	Қысқаша сипаттамасы
1	Мұнай	Атырау облысы	Теңіз, Қарашығанақ, Жаңажол	Қазақстандағы ең ірі мұнай кен орындары, әлемдік деңгейдегі ірі кен орындары
2	Мұнай	Маңғыстау облысы	Жетібай, Өзен, Қаламқас, Қарамандыбас	Мұнай өндіру көлемі бойынша маңызды орын алады
3	Мұнай	Ақтөбе облысы	Қожасай, Өріктау	Мұнай өндіру көлемі өсіп келе жатқан өңір
4	Мұнай	Қызылорда облысы	Жаңақорған, Қармақшы	Мұнай өндіру көлемі өсіп келе жатқан өңір
5	Газ	Маңғыстау облысы	Жетібай, Өзен, Қаламқас, Қарамандыбас	Газ өндіру көлемі жоғары өңірлердің бірі
6	Газ	Атырау облысы	Қарашығанақ, Жаңажол	Газ өндіру көлемі жоғары өңірлердің бірі
7	Газ	Ақтөбе облысы	Қожасай, Өріктау	Газ өндіру көлемі өсіп келе жатқан өңір
8	Газ	Қызылорда облысы	Жаңақорған, Қармақшы	Газ өндіру көлемі өсіп келе жатқан өңір
9	Көмір	Қарағанды облысы	Қарағанды көмір алабы	Қазақстандағы ең ірі көмір бассейні
10	Көмір	Шығыс Қазақстан облысы	Шүлбі, Өскемен, Бұқтырма	Өңірдегі ірі көмір кен орындары

Соңғы жылдары ЖЭК үлесі қарқынды өсіп келе жатқанына қарамастан, оның жалпы электр энергиясындағы үлесі шамамен 6%-дан астам мөлшерді құрайды. Оны келесі кесте түрінде көрсетіп кетсек.



Сурет. 1 – Қазақстандағы ЖЭК стратегиялық дамуы 2030 жылға дейінгі өсу болжамы

Қазақстанда ЖЭК үлесі күннен күнге артып келеді, бұл қуантады әрине. Әсіресе, күн, жел жобалары көптеп іске қосылуда. 2025 жылы қол жеткіземіз деген 6 пайыздық межеге 2024 жылдың соңында ЖЭК үлесі 6%-дан асып, қол жеткіздік. Енді алдағы уақытта 2030 жылы ЖЭК үлесі 15%-ға, 2050 жылға дейін ЖЭК және баламалы энергия көздерінен алынатын энергия мөлшері 50%-ға, ал 2080 жылға таман осы көрсеткіш 80%-ға дейін көтеріледі деп жоспарлануда.

Еуропа елдеріндегі жағдайды айтар болсақ, жалпы, Еуропа елдерінің ішінде айта кететін бірнеше мемлекеттер: Германия — ЖЭК технологияларын кеңінен енгізу бойынша әлемде алдыңғы қатарда тұрған ел. Оның «Энергетикалық өтпелі» яғни, *Energiewende* бағдарламасы арқылы жаңартылатын энергия көздеріне инвестиция жасауға арналған ірі қаржы ресурстары бөлінген. Германияда күн және жел энергиясы өндірісі елдің жалпы энергетикалық балансында маңызды орын алады.

Ал, Дания — жел энергетикасы бойынша әлемде көшбасшы елдердің бірі. 2020 жылы Дания жалпы энергия тұтынуында жаңартылатын көздер үлесін 50%-ға дейін жеткізді, бұл Қазақстанмен салыстырғанда 30 жылға алда деген сөз. Мұнда жел энергетикасын дамытуға мемлекет тарапынан тұрақты қолдау көрсетілуде.

Испанияда күн энергиясы әлемдегі ең үлкен күн энергетикалық жүйелерінің бірі. Ел жаңартылатын энергия көздерінің үлесін 40%-дан астамға жеткізді.

Норвегияның электр энергиясының шамамен 98%-ы гидроэлектр станцияларынан өндіріледі. Бұл елде жаңартылатын энергияның кеңінен пайдаланылуы табиғи жағдайларға байланысты болғанымен, Норвегияның ЖЭК саясаты да елдің энергетикалық секторында басты орын алады.

Азия елдеріндегі жағдайға тоқталсақ, Азия елдерімен салыстырғанда Қазақстандағы жаңартылатын энергия көздерін (ЖЭК) енгізу жағдайын қарастырсақ, бұл біздің еліміздің нарықтағы ЖЭК-тің әлеуетін бағалауға мүмкіндік береді. Азияда әртүрлі даму деңгейінде жатқан елдер бар, олардың кейбіреулері ЖЭК саласында үлкен жетістіктерге жеткен. Азия елдерінің ішіндегі көшбасшы мемлекет — Қытай. Олар климаттың өзгеруімен күресу, энергия тәуелсіздігін арттыру және экологиялық тұрақтылықты қамтамасыз ету мақсатында ЖЭК-ке басымдық беріп отыр.

Қытай — әлемдегі ең ірі жаңартылатын энергия көздері нарығын құрып отырған ел. Қытайдың ЖЭК саласындағы жетістіктері өте әсерлі. Жел және күн энергиясында 2024 жылы Қытай рекордтық 357 ГВт қуат орнатты, бұл 2023 жылмен салыстырғанда 45%-ға көп.

Күн энергиясы бойынша 2024 жылы 240 ГВт жаңа күн қуатын орнатып, жалпы қуат көлемін 1 ТВт-тан асырды.

Жел энергетикасы саласында 159 ГВт жаңа қуат орнатылды, бұл әлемдегі ең үлкен көрсеткіштердің бірі.

Күн және жел энергетикасы саласындағы рекордтық көрсеткіштер, энергия сақтау жүйелерін дамыту және халықаралық деңгейде жабдықтар экспортын ұлғайту Қытайдың жасыл энергетика саласында бірнеше жылдап алға жылжуын көрсетеді.

Кесте 2 – Қазба отындарының ішкі нарықтағы бағасы мен субсидиялар.

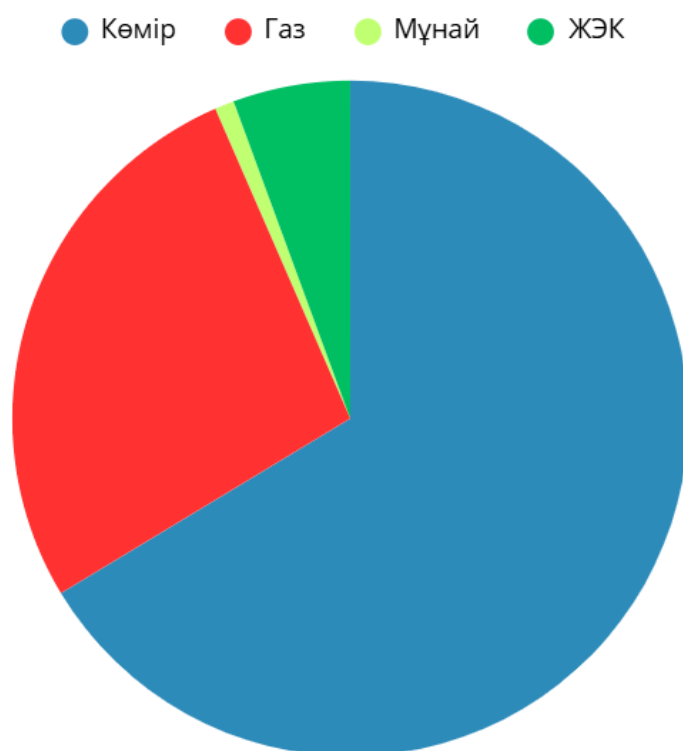
№	Энергия көзі	Орташа ішкі баға (\$ немесе теңге/кВт·сағ)	Субсидия көлемі (млн \$)	Энергетикалық жүйедегі үлесі (%)	Ескерту
1	Көмір	0.02–0.03 \$/кВт·сағ	400	71%	Ең арзан әрі кең қолданылатын
2	Табиғи газ	0.03–0.05 \$/кВт·сағ	300	29%	ЖЭО және тұрғын үй секторында
3	Мұнай	0.06–0.08 \$/кВт·сағ	150	1-2%	Көлік және өнеркәсіпте көп

Бұл кесте үш негізгі қазба отын түрінің ЖЭК-пен салыстырғанда арзан екенін және субсидия арқылы бәсекеге қабілеттілігін арттырып отырғанын көрсетеді.

Дегенмен, ішкі нарықтағы көмір мен газдың салыстырмалы түрде арзан бағасының арқасында дәстүрлі энергетикадағы мұнай, газ, көмір сияқты қазба отындардың үстемдігі әлі де сезіледі. Сонымен қатар қазба отындарына берілетін субсидиялар мен қолдау шаралары әлі де айтарлықтай көлемде сақталып, ЖЭК жобаларының экономикалық тартымдылығына кері әсерін тигізуде. Қазба отындарына беріліп жатқан тікелей және жанама субсидиялар электр энергиясының бағасын айтарлықтай төмендетіп, жаңартылатын энергияға қатысты жобалардың нарықтағы бәсекелестігін әлсіретіп келеді десек болатын шығар.

ЖЭК дамуының шектеуші факторлардың бірі ретінде, инфрақұрылымдық кедергілерді де атап айтуға болады. Еліміздегі электр желілері, негізінен, ірі ЖЭО на, яғни көбінесе көмірмен жұмыс жасайтын станциялардың қолданысына бейімделген. ЖЭК-ті тиімді интеграциялау үшін жаңа желілер керек, сондай-ақ аккумуляторлар және заманауи диспетчерлік жүйелер де қажет.

ЖЭК дамуына кедергі болатын факторлардың қатарына қаржыландыру мен инвесторлардың мәселелерін жатқызуға болады. ЖЭК жобалары үшін ұзақ мерзімді және арзан қаржы көздері жеткіліксіз. Валюталық тәуекелдер мен елдік тәуекелдер инвесторларға қосымша қиындықтар туғызады. Инвесторлар келісімшарттық шарттар мен құқықтық тұрақтылыққа сенімсіздік танытады. Сонымен қатар, Қазақстандағы ЖЭК Ассоциациясының төрағасы, энергетик әрі эколог Арман Көшкінбаев еліміздегі ЖЭК дамуына үлес қосатын инвесторлардың көпшілігі шетелдік инвесторлар екенін атап өтіп, жергілікті кәсіпкерлеріміздің үлесі аз екенін айтты.



Сурет. 2 – Қазба отындары мен ЖЭК үлесі (энергобаланс ішіндегі)

Бір қуантатыны – ЖЭК жобаларының өзіндік құны төмендеуде. Егер алғашқы жобалардың бірі болса, Жамбыл облысындағы Бурное күн электр станциясы 200 миллион долларға кілтпен салынған, бұл қымбатқа түсті. Ал жақында Алматы облысындағы Қапшағайда «Нұрғиса» жобасы 70 миллион долларға салынды. Бұл тарифтердің төмендеуіне әсер етеді, бұл өте жақсы жаңалық.

Кесте 2. Қазақстанның ірі ЖЭК жобалары.

№	Жоба атауы	Облыс	Құны (млн \$)	Энергия түрі	Жобаның іске қосылу жылы	Ескертпелер
1	Бурное КЭС	Жамбыл облысы	200	Күн энергиясы	2018–2019	Алғашқы ірі жоба
2	Нұрғиса	Алматы облысы	70	Күн немесе жел энергиясы	2022	Тариф төмендеуіне әсері

ЖЭК көздерінің дамуы бюджетке тәуелді екені анық байқалады. Мұнай-газдан түскен кірістер мемлекеттік саясатты «дәстүрлі» секторға бағыттап отыр. Энергетикалық инфрақұрылым мен басқару жүйесі негізінен көмір мен газға сүйенгендіктен, жаңа технологияларды енгізу әлі де баяу жүруде. Ішкі нарықтағы

арзан көмір, мұнай мен газ ЖЭК жобаларының экономикалық тартымдылығын едәуір төмендетеді.

Қазақстан жаңартылатын энергия көздерінің үлесін арттыруда белгілі бір жетістіктерге жеткенімен, қазба отындарының қолжетімділігі экономикалық, инфрақұрылымдық, институционалдық және басқа да кедергілерді күшейтеді. Энергетикалық ауысуды жеделдету үшін субсидияларды реформалау, электр желілерін жаңғырту, қаржыландыруды кеңейту және институционалдық өзгерістерді енгізу қажет. Бұл шаралар Қазақстанның энергетикалық қауіпсіздігін арттырып қана қоймай, халықаралық климаттық міндеттемелерін орындауға да ықпал етеді және еліміздегі ЖЭК дамуын жеделдетуге мүмкіндік береді.

Пайдаланылған әдебиеттер

1. https://qazaqgreen.com/en/news/kazakhstan/2755/?utm_source
2. Расмухаметова А.С. Жаңғыртылатын энергия көздері. «Электр энергетикасы» бағыты бойынша білім алатын бакалавр студенттеріне арналған Оқу құралы. - Алматы: АЭЖБУ, 2022. -114 б.
3. Расмухаметова А.С. Альтернативті энергетика және энергия үнемдейтін технологиялар. «Электр энергетикасы» бағыты бойынша білім алатын бакалавр студенттеріне арналған Оқу құралы. - Алматы: АЭЖБУ, 2023. – 120 б.
4. <https://temirtautynysy.kz/>
5. Күн энергиясының түрлендіргіштері. : оқу құралы / А.С. Расмухаметова, Г. Ж. Ноғайбекова; ҚР ҒЖБМ, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті. - Алматы: ADAL KITAP, 2025. -260 б. - Қазақстан.
6. Расмухаметова А.С. Альтернативті энергетика және энергия үнемдейтін технологиялар. «Электр энергетикасы» бағыты бойынша білім алатын бакалавр студенттеріне арналған Оқу құралы. - Алматы: АДАЛ баспасы, 2023. – 159 б.
7. <https://madenportal.kz/qazaqstan1/>
8. <https://apnews.com/article/wind-solar-energy-china-climate-carbon-emissions>
9. Альдибеков И.Т. Қайта жаңғыртылатын энергия көздері және энергияны үнемдеу. 5B071800 – Электр энергетикасы мамандығының студенттеріне арналған дәрістер жинағы. – Алматы: АЭЖБУ, 2016. – 107 б.
10. Қойшиев Т.Қ. Жаңғыртылатын энергия көздері: Оқулық. - Алматы: 2013. - 256 б.
11. Дүкенбаев К.Д., Нүрекен Е. Энергетика Казахстана. – Алматы, 2001. – 312 б.
12. Куашнинг Ф. Жаңартылатын энергия көздері жүйелері. Технология-Есеп-Үлгілеу. - Астана: Foliant баспасы, 2014.- 432 б.

АВТОНОМДЫ ЭЛЕКТРМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ КОНДЕНСАТОРЛАРДЫ ПАЙДАЛАНЫП ЭЛЕКТР ҚОЗҒАЛТҚЫШЫН ІСКЕ ҚОСУДЫ МОДЕЛЬДЕУ

Рашидов Ш.У.*, Умбеткулов Е.К.

Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы
қ., Қазақстан

e-mail: sh.rashidov@aes.kz*, e.umbetkulov@aes.kz

Аңдатпа. Мақалада күн және жел энергиясының көздері бар автономды электрмен жабдықтау жүйесінде конденсаторларды қолдану арқылы асинхрондық қозғалтқыштардың қосылу өтпелі процесстерін жеңілдету мәселелері қарастырылған. Автономдық электрмен қамту жүйесін моделдеу RTDS бағдарлама-аппаратық кешенінде орындалды. Зерттеудің мақсаты: Шалғайдағы ауыл шаруашылықтарындағы фотоэлектрлік панельдерден және жел электр станциясынан қоректенетін асинхронды қозғалтқыштардың қосылу процессін конденсаторлар көмегімен жеңілдеуін тәжірибе жүзінде негіздеу.

Кілт сөздер: конденсаторлар, кернеудің төмендеуі, нақты уақыттағы есептеу, асинхронды қозғалтқышты қосу.

Кіріспе

Жер аумағы үлкен және халықтың тығыздығы төмен Қазақстанда ірі энергетикалық жүйелермен байланыспаған, электр желілері жеткізілмеген көптеген шалғай ауыл шаруашылықтары бар. 2022 жылы еліміздің тірек ауылдық елді мекендерін электрмен қамту деңгейі 99,1 пайызды құрады. Шамамен 9 мың шаруа және фермер шаруашылықтары электр энергиясымен қамтамасыз етілмеген күйінде қалады [1]. Мұндай нысандарды электр қуатымен қамтамасыз етудің тиімді жолдарының бірі жел және күн энергиясының көздерін пайдалану болып табылады. Кернеудің төмендеуі осындай автономды электрмен жабдықтау жүйелеріндегі ең маңызды мәселелердің бірі болып табылады. Кернеудің төмендеуін тудыратын факторлардың бірі асинхронды қозғалтқыштарды іске қосу болып табылады. Тарату шиналарында кернеу шинаға қосылған қозғалтқыштың іске қосу тогына тәуелді параметр. Егер қуат көзі әлсіз немесе жүктеме қуатымен деңгейлес болса қозғалтқыштардың іске қосу тогына әсерінен кернеудің төмендеуі айтарлықтай болады [2].

Аталған проблеманың шешімі ретінде әдетте келесідей әдістер қолданылады:

- арнайы қосу сұлбаларын қолдану;
- жеңіл іске қосу құрылғыларын қолдану;
- жиілік түрлендіргіштерін пайдалану.

Бұл мақалада келтірілген әдістерге балама ретінде электр энергиясын сақтағыштарды қолдану әдісін ұсынамын.

1. Автономды электрмен жабдықтау жүйесін моделдеу

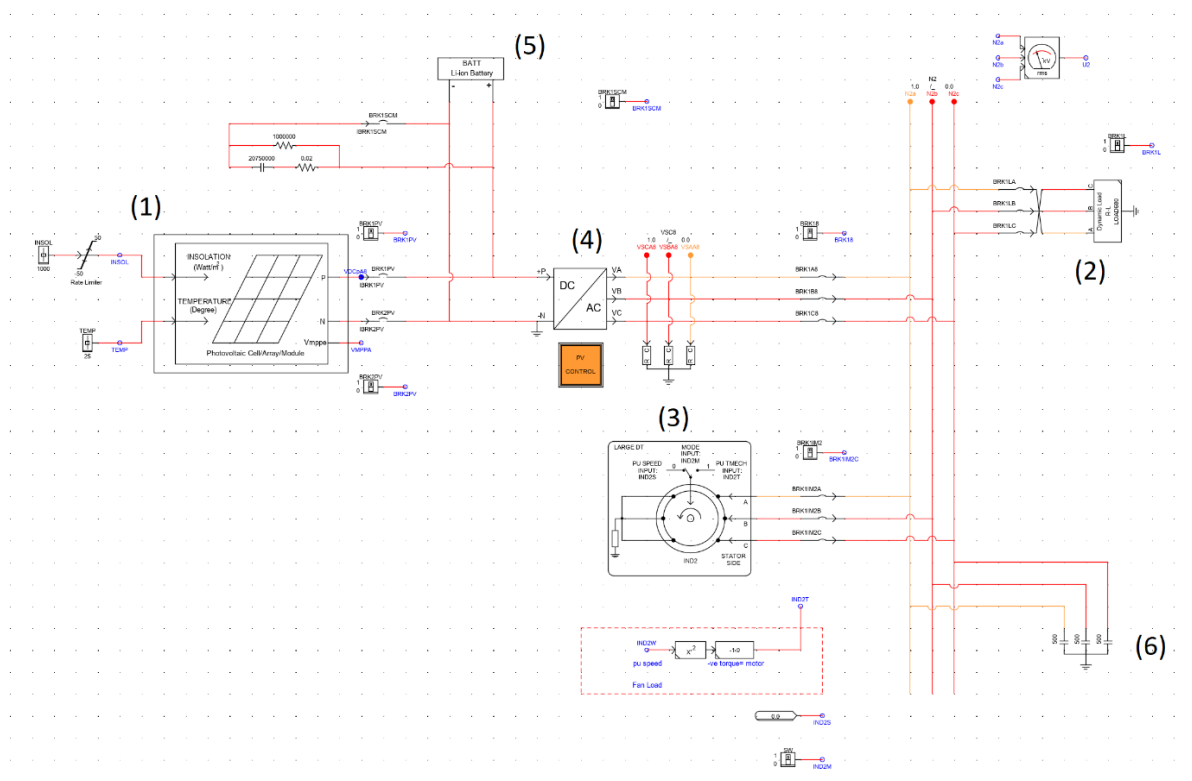
Автономды электрмен жабдықтау жүйесін моделдеу RTDS бағдарлама-аппаратық кешенінде орындалды.

RTDS аппараттық-бағдарламалық кешенінде автономды электрмен жабдықтау жүйелерін (микрожелілерді) модельдеудің негізгі артықшылығы - бұл циклдегі аппараттық құралды (Hardware-in-the-Loop, HIL) пайдалану арқылы нақты уақыт режимінде модельдеу мүмкіндігі. Бұл нақты қуат жүйесінде сынау мүмкін емес немесе қауіпті күрделі басқару жүйелерін, қорғаныс жүйелерін және қуат жабдығын жоғары дәлдікпен және шынайы сынауға мүмкіндік береді.

Моделдеу барысында үшін келесідей схема элементтері қолданылды:

- Фотоэлектрлік PV панелі;
- Эквивалентті жүктеме;
- Асинхронды қозғалтқыш;
- Инвертор;
- Аккумуляторлық батарея;
- Конденсатор моделі.

RTDS бағдарлама-аппаратық кешенінде дайындалған автономдық электрмен жабдықтау жүйесінің моделі 1 суретте келтірілген.



1 сурет - Автономдық электрмен жабдықтау жүйесінің моделі.

Төменде дайындалған цифрлық моделдің элементтеріне сипаттама келтіріледі.

1) *Фотоэлектрлік PV панелі.* Фотоэлектрлік PV панелі RTDS бағдарлама-аппаратық кешеніндегі дайын элементтер базасынан алынған.

2) *Эквивалентті жүктеме.* Эквивалентті жүктеме симуляциясы ретінде RTDS БАК құрамындағы «rtds_udc_DYLOAD» элементі қолданылды. Бұл модель үш фазалы жүйелердегі эквивалентті жүктемені бейнелеуге арналған. Ол статикалық жүктемені жүзеге асырады және тұрақты кедергі түрінде де, белсенді және реактивті құрамдастарының үйлесімі түрінде де бапталуы мүмкін. Жүктеме профильдерін орнату мүмкіндігі бар, бұл кернеу мен жиілік өзгерген кезде тұтынушылардың мінез-құлқын модельдеуге мүмкіндік береді. Үлестіргіш желілердің жұмыс режимдерін және жүктеменің жүйе тұрақтылығына әсерін зерттеу үшін қолданылады.

3) *Асинхронды қозғалтқыш.* Асинхронды қозғалтқыш симуляциясы ретінде RTDS БАК құрамындағы «lf_rtds_risc_sld_INDM» элементі қолданылды

4) *Инвертор.* Инвертор симуляциясы ретінде RTDS БАК құрамындағы «_rtds_3phAVMv1» элементі қолданылды

5) *Аккумуляторлық батарея.* Аккумуляторлық батарея симуляциясы ретінде RTDS БАК құрамындағы «_rtds_libat.def» элементі қолданылды

6) *Үш фазалы конденсаторлар моделі.* Үш фазалы конденсатор симуляциясы ретінде RTDS БАК құрамындағы «lf_rtds_sherc_sld_SHUNTCAT» элементі қолданылды [3].

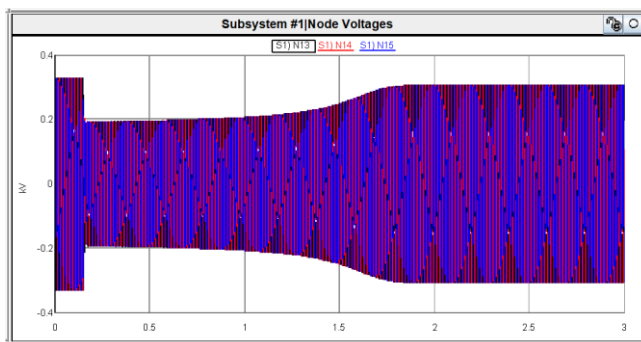
2. Асинхронды қозғалтқышты қосу кезіндегі өтпелі процессті моделдеудің нәтижелері

Асинхронды қозғалтқышты қосу өтпелі процесстері екі жағдай үшін қарастырылған: «тікелей қосу» және «үш фазалы конденсаторлар арқылы алдын ала қоздырып қосу». Цифрлық моделдеу сипаттамалары 1-кестеде келтірілген асинхрондық қозғалтқыш үшін орындалды.

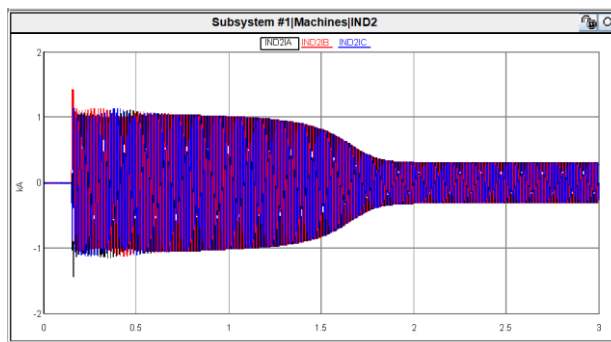
1-кесте. Асинхронды қозғалтқыш деректері

Типі	Қуаты, кВт	Кернеуі, В	Қуат коэф-ті	Статор тогы, А	Іп/Ін	Мп/Мн	Мм/Мн
5АИ 180 М8	15	380	0,78	33,36	5,5	2	2

«Тікелей қосу» және «үш фазалы конденсаторлар арқылы алдын ала қоздырып қосу» әдістерімен жүзеге асырылған өтпелі процесс нәтижелері сәйкесінше 2 және 3 суреттерде келтірілген. 2-а, 3-а суреттерінде асинхронды қозғалтқыштың кірістерінде өлшенген кернеу мәндері және 2-б, 3-б суреттерінде асинхронды қозғалтқыштың кірістерінде өлшенген токтың мәндері көрсетілген.

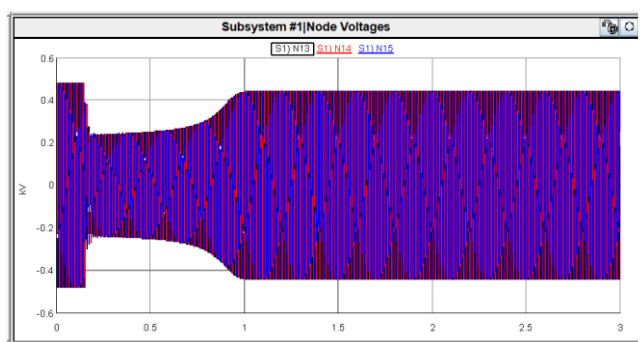


а)

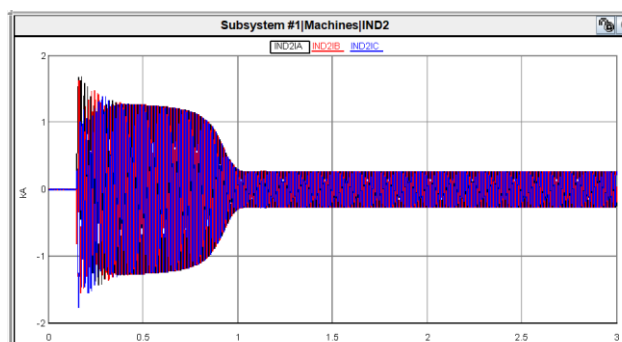


б)

2 сурет – Асинхронды қозғалтқышты «тікелей қосу» әдісі нәтижелері



а)



б)

3 сурет – Асинхронды қозғалтқышты «үш фазалы конденсаторлар арқылы алдын ала қоздырып қосу» әдісі нәтижелері

Алғашқы тәжірибеде 2-а суретіне сәйкес асинхронды қозғалтқыш қосылған кезде желілік кернеудің 198 В дейін төмендеуі және қосылу өтпелі процессі 1,7 секундқа созылғандығын байқаймыз.

Екінші жағдайда конденсаторларды қолдану арқылы алдын ала кернеуді жоғарылату әдісі қарастырылған. Бұл жағдайда алғашқы кернеу 430 В құрайды. Желілік кернеудің бұндай мәні автономдық электрмен камту жүйелерінде рұқсат етілетін болып есептеледі [4]. Асинхронды қозғалтқышты іске қосу өтпелі процессінде желілік кернеудің 235 В дейін төмендеуін және өтпелі процесстің 0,7 секундқа дейін созылғандығын көреміз.

Асинхронды қозғалтқыш кірістеріндегі токтың мәні екі әдістерде де бірдей шаманы көрсетеді. Алайда іске қосу тогының әсер ету ұзақтығы өтпелі процесстің қысқаруына байланысты азаяды.

3. Қорытынды

Асинхрондық қозғалтқышты «тікелей қосу» және «үш фазалы конденсаторлар арқылы алдын ала қоздырып қосу» әдістерін RTDS бағдарлама-аппаратық кешенінде моделдеу екінші әдістің оң нәтиже беретіндігін көрсетті. Зерттеу жұмыстары электр энергиясын сақтағыштарды қолдану сұлбаларын және алгоритмдерін күрделендіру бағытында жалғастырылатын болады.

Әдебиеттер тізімі

1. Концепция развития сельских территорий Республики Казахстан на 2023 – 2027 годы // Постановление Правительства Республики Казахстан от 28 марта 2023 года № 27.
2. Облакевич С.В. «Расчет предельно допустимой мощности двигательной нагрузки запитываемой от автономной ДЭС», «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промэлектро, №3, 2006 г.
3. RTDS Technologies Manual «Power system components».
4. EN 50160 — «Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks».

УДК 621.548:621.316.925:551.509.313:004.9

КОМПЛЕКСНЫЕ МЕТОДЫ МОЛНИЕЗАЩИТЫ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГРОЗОВЫХ РИСКОВ В ВЕТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Курбонов Н.Н., Рашидов Н.Х.*

Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент,
Узбекистан

*e-mail: nuralibekrashidov@gmail.com

Введение

Потребность мировой экономики в энергии продолжает расти, и всё более весомую роль в её обеспечении играют возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Данный тренд обусловлен не только необходимостью снижения выбросов парниковых газов и выполнения международных климатических обязательств, но и стремлением к энергетической независимости, диверсификации топливно-энергетического баланса и снижению зависимости от ископаемого топлива. Наиболее интенсивное развитие демонстрирует ветроэнергетика, которая за последние десятилетия превратилась в один из ключевых сегментов глобальной энергетики.

В 2024 году был зафиксирован рекордный прирост установленных мощностей ветроэнергетики — 117 ГВт, что является наибольшим показателем за всю историю развития этой отрасли. При этом на долю Китая пришлось 68,2% новых мощностей, что подтверждает его лидерство на мировом рынке ветроэнергетики. Благодаря столь стремительному росту совокупная установленная мощность ветровых электростанций в мире достигла 1,14 ТВт, что сопоставимо с уровнем генерации традиционных крупных энергетических комплексов.

Следует отметить, что рост касался в первую очередь наземных (onshore) ветроустановок, в то время как развитие морской (offshore) ветроэнергетики

показало некоторый спад. В 2024 году прирост оффшорных установок составил лишь 8 ГВт, что ниже уровня предыдущего года. Данное сокращение связано с рядом факторов: высокой капиталоемкостью строительства, необходимостью сложных инженерных решений в условиях морской среды, логистическими трудностями и удорожанием проектов на фоне глобальной инфляции. Тем не менее, несмотря на временный спад, морская ветроэнергетика сохраняет стратегическую значимость, так как позволяет использовать устойчивый ветровой потенциал прибрежных регионов и обеспечивает более стабильную генерацию электроэнергии.



Рис. 1. – Историческое развитие новых установок ветроэнергетики в мире (2001–2024 гг.)

Согласно прогнозам международных энергетических агентств и отраслевых ассоциаций, в последующие годы мировой рынок ветроэнергетики будет продолжать демонстрировать динамичный рост. К 2030 году ожидается, что ежегодное увеличение мощностей достигнет 194,1 ГВт (Рис. 1), что практически вдвое превысит рекордные показатели 2024 года. Этот рост будет обусловлен сочетанием факторов: государственной поддержкой проектов «зелёной» энергетики, развитием технологий хранения энергии, снижением себестоимости производства ветротурбин, а также повышением эффективности систем интеграции ВИЭ в энергосистемы.

Таким образом, ветроэнергетика постепенно превращается в один из ключевых драйверов глобальной энергетической трансформации. Рекордный прирост мощностей в 2024 году подтверждает её стратегическое значение для мировой экономики, а ожидаемое ускорение темпов строительства ветровых электростанций в ближайшие годы станет важным шагом на пути к формированию устойчивой и низкоуглеродной энергетики будущего [1,2].

Основной текст

При подготовке данной статьи были использованы следующие понятия, материалы и величины. Спутниковые метеорологические данные — такие как плотность облаков, интенсивность радиации, количество и местоположение молний, а также глобальные метеокарты — играют ключевую роль в повышении

эффективности молниезащиты на ветроэлектростанциях. Каждый из этих параметров позволяет выявлять определенные метеопасности, своевременно прогнозировать риски и активировать автоматизированные системы защиты. Плотность облаков (Cloud Density) определяется с использованием спутников MODIS (NASA) и EUMETSAT, данные которых доступны через открытые API и обновляются каждые 3–6 часов. Плотность рассчитывается по формуле [3]:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

где ρ — плотность облаков (г/м^3), m — масса водяного пара или льда, V — объем облака.

Спутники (например, MODIS) определяют данную информацию на основе обратного отражения радиации в инфракрасном спектре (cloud optical thickness) и температуры верхней границы облаков. В некоторых случаях для оценки количества воды в облаках применяется параметр жидкое водное содержание (liquid water content, LWC), который рассчитывается по следующей формуле:

$$LWC = \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot N \cdot \rho_w$$

где, r — радиус капель воды (м), N — число капель в единице объема ($1/\text{м}^3$), ρ_w — плотность воды ($\approx 1000 \text{ кг/м}^3$).

Повышенная плотность указывает на высокую конвективную активность и возможную электрическую зарядку, что способствует возникновению молний. Это позволяет заранее определить потенциальную грозовую активность вблизи ВЭС. Интенсивность радиации (Radiation Intensity) измеряется с помощью спутников MODIS и Copernicus, обновляется 1–2 раза в день и рассчитывается по формуле [4-6]:

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

где E — плотность потока излучения (Вт/м^2), Φ — поток энергии, A — площадь поверхности. Высокая радиационная нагрузка приводит к перегреву инверторов, сенсоров и других электронных компонентов турбины, что увеличивает риск отказов и требует активации тепловых защит. Местоположение и количество молний (Lightning Strikes) определяются с помощью систем GLM (GOES) и LIS (ISS), обновляющихся каждые 15 минут. Используется метод TOA (Time of Arrival), где координаты молнии рассчитываются на основе разницы во времени поступления сигнала на несколько сенсоров:

$$f(x, y) = f(t_1, t_2, t_3, \dots)$$

Это позволяет точно определить расстояние до эпицентра разряда и запустить автоматическое отключение турбины или переключение в безопасный режим.

Глобальные метеокарты (Weather Maps), предоставляемые моделями GFS и ECMWF, обновляются каждые 1–3 часа. Они отображают макроатмосферные

процессы — давление, температуру, влажность, направления воздушных потоков — и позволяют прогнозировать приближение циклонов, фронтов и зон конвекции. Это критически важно для оперативного реагирования на ухудшение погодных условий в зоне ВЭС.

Итак, интегрированное использование этих параметров обеспечивает точную оценку молниевой опасности, эффективное управление рисками и повышение общей надежности и безопасности ветроэнергетических установок.

Наземные сенсорные метеорологические данные — температура, давление, влажность, скорость и направление ветра, количество осадков и наличие заряженных частиц — измеряются в реальном времени с помощью IoT-датчиков (BME280, DHT22, YL-83, VEMML6075, анемометры от SparkFun и Adafruit), совместимых с платформой Raspberry Pi 5. Температура (T), давление (P) и относительная влажность (RH) определяются по следующей формуле:

$$RH = \frac{e}{e_s} \cdot 100\%$$

где e — парциальное давление водяного пара, e_s — давление насыщения. Скорость ветра может быть рассчитана через кинетическую энергию воздуха по формуле:

$$v = \sqrt{\frac{2E}{\rho}}$$

или измеряется напрямую с помощью датчиков. Концентрация заряженных частиц определяется через напряжённость электрического поля E в мВ/м. Мониторинг этих параметров критически важен для молниезащиты ВЭС, поскольку: 1) температура, давление и влажность позволяют прогнозировать условия, способствующие электризации облаков и разрядам; 2) скорость и направление ветра дают информацию о потенциальной турбулентности и нагрузках на конструкцию; 3) осадки и град указывают на вероятность механических повреждений; 4) электрическое поле свидетельствует о росте электростатической активности и приближении грозы. Совокупный анализ этих данных обеспечивает автоматическую активацию защитных систем и перевод турбины в безопасный режим [7,8].

Системы LIDAR и РАДАР-наблюдения обеспечивают измерение ключевых параметров, таких как движение электрических зарядов в облаках, вертикальные потоки воздуха, структура и высота облаков, а также вероятность грозовой активности в атмосфере. Движение зарядов определяется по напряжённости электрического поля по формуле:

$$E = \frac{V}{d}$$

где E — напряжённость (кВ/м), V — разность потенциалов, d — расстояние. Эти данные получаются с помощью измерителей электрического поля (прототипы

Open Source) и обновляются каждые 1–5 минут. Вертикальные потоки воздуха определяются в реальном времени с помощью ультразвуковых датчиков и позволяют оценить наличие сильной конвекции. Структура и высота облаков фиксируются профессиональными LIDAR-устройствами (ceilometers) каждые 10 минут – 1 час и позволяют определить тип и плотность облачного слоя. Вероятность молний в атмосфере рассчитывается на основе динамики напряжённости электрического поля, влажности и температуры по формуле:

$$P(\text{молнии}) = f(E, RH, T)$$

и обновляется каждые 5–10 минут. Мониторинг этих параметров критически важен для молниезащиты ВЭС, так как позволяет выявить ранние признаки развития грозовых процессов, запустить систему оповещения и перевести турбины в безопасный режим. Каждый параметр выполняет отдельную функцию: накопление зарядов — определяет риск разрядов, вертикальные потоки — указывают на потенциальные грозовые ячейки, высота облаков — оценивает мощность облачной массы, а вероятность молнии — определяет прямую угрозу ударов.

Специализированный мониторинг молний включает в себя оценку силы и продолжительности разрядов, статистику мест ударов молнии, а также мониторинг электромагнитных волн. Эти параметры играют важнейшую роль в обеспечении надёжной защиты ветроэлектростанций от грозовых разрядов. Сила тока и длительность молнии измеряются с помощью профессионального детектора LD-250 с частотой обновления 1 минута. Мгновенный ток молнии $I(t)$ может быть представлен экспоненциальной моделью:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

где I_0 — максимальный ток (кА), α — коэффициент затухания, t — время. Этот параметр позволяет определить потенциальный ущерб от разряда и активировать защитные механизмы.

Статистика ударов молнии собирается ежегодно из открытых баз данных, API как правило отсутствует. Данные используются для картирования наиболее опасных зон и планирования расположения оборудования. Мониторинг электромагнитных волн осуществляется в реальном времени с помощью EMF-сенсоров, совместимых с Raspberry Pi. Мощность сигнала оценивается по формуле:

$$P = 10 \log_{10} \left(\frac{E^2}{R} \right)$$

где P — мощность сигнала (µВ/м), E — напряжённость электрического поля, R — опорное сопротивление. Этот параметр позволяет фиксировать всплески электростатической активности и предсказывать грозовую опасность до появления молний. Совместный анализ этих данных позволяет своевременно отключать турбины, переходить в безопасный режим и минимизировать ущерб от атмосферных разрядов.

Исторические и статистические метеоданные — такие как количество грозовых дней в году, история аварий и эффективность системы молниезащиты — играют ключевую роль в оценке долгосрочной устойчивости ветроэлектростанций к грозовым рискам.

Количество грозовых дней в году (N_g) берется из открытых статистических баз данных и обновляется один раз в год. Если значение превышает два дня ($N_g > 2$), территория считается опасной согласно стандарту IEC 62305:

$$N_g = \text{Количество грозовых дней в году}$$

Этот показатель позволяет определить уровень грозовой опасности в конкретном районе. История аварий анализируется ежемесячно на основе внутренних архивов, выявляя причины отказов оборудования и уязвимые элементы системы при воздействии молний.

Эффективность системы молниезащиты рассчитывается ежеквартально по ручным отчетам по следующей формуле:

$$PE = \left(1 - \frac{N_f}{N_t}\right) \cdot 100\%$$

где N_f — количество отказов, вызванных ударами молнии, N_t — общее количество зафиксированных ударов. Этот параметр позволяет количественно оценить работоспособность и надежность установленных защитных решений. Комплексный анализ этих данных необходим для оптимизации стратегии защиты, корректировки проектных решений и обоснования модернизации оборудования.

В результате проведенного исследования установлено, что обеспечение надёжности и устойчивости работы крупных ветроэнергетических установок невозможно без комплексного подхода к мониторингу и защите от неблагоприятных атмосферных воздействий. Особое значение имеет молниезащита, так как грозовые процессы представляют собой один из ключевых факторов риска для ветротурбин и сопутствующего электрооборудования.

1. Показано, что использование спутниковых данных (MODIS, EUMETSAT, Copernicus, GLM, LIS) позволяет своевременно выявлять облачные структуры, грозовую активность, интенсивность радиации и количество молний, что даёт возможность прогнозировать опасные метеоусловия.

2. Доказана эффективность применения наземных IoT-сенсоров (температура, давление, влажность, скорость ветра, электрическое поле), интегрированных в цифровые платформы (Raspberry Pi, SCADA), которые обеспечивают детальный контроль параметров в режиме реального времени и автоматическую активацию защитных алгоритмов.

3. Продемонстрировано, что применение LIDAR- и РАДАР-систем для анализа вертикальных потоков, структуры облаков и вероятности грозовых процессов повышает точность прогнозов и способствует раннему предупреждению аварийных ситуаций.

4. Разработанные модели расчёта (LWC, RH, вероятность молний $P(E, RH, T)$, экспоненциальные зависимости тока разряда $I(t)$, индекс эффективности PE) позволяют количественно оценить уровень угрозы и надёжность установленных защитных решений.

5. Исторические и статистические данные (число грозových дней, архив аварий, эффективность молниезащиты) доказали свою значимость для долгосрочного планирования модернизации оборудования и выбора оптимальных площадок для размещения ВЭС.

Таким образом, интеграция спутникового мониторинга, IoT-сенсорных систем и методов статистического анализа обеспечивает создание многоуровневой архитектуры защиты ветроэнергетических установок. Это позволяет не только повысить надёжность и безопасность работы турбин, но и существенно снизить эксплуатационные риски, продлить срок службы оборудования и обеспечить устойчивое развитие ветроэнергетики в условиях растущих требований к энергетической безопасности и экологической устойчивости.

Список литературы

1. Balkan Green Energy News. Gwec: рекордные 117 ГВт ветровой энергии установлены в 2024 году. 2024. Доступно по: <https://balkangreenenergynews.com/gwec-record-wind-power-capacity-was-installed-globally-in-2024/>. Дата обращения: 25.05.2025.
2. International Energy Agency. Официальный сайт. Доступно по: <https://www.iea.org/>. Дата обращения: 25.05.2025.
3. Ministry of Energy. Официальный портал. Доступно по: <https://www.minenergy.com/>. Дата обращения: 25.05.2025.
4. Patil A., Pathak C., Alduse B. Обзор рисков природных опасностей для ветроэлектростанций // *Energies*. 2023. Т. 16, №3. С. 1207. <https://doi.org/10.3390/en16031207>
5. Ferrareto A.J., Mazzilli E.N.C., França L.S.R. Колебания высотных зданий, вызванные ветром: обзор критериев комфортности // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2015. Т. 142. С. 26–42. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.03.001>
6. Genter E. Повреждение турбины Vineyard Wind после удара молнии // *Vineyard Gazette*. 2 марта 2025. Доступно по: <https://vineyardgazette.com/news/2025/03/02/broken-vineyard-wind-turbine-struck-lightning>
7. Zhang L., Kurbonov N.N., Khoshimov F.A. A comprehensive approach to integrating and optimizing meteorological data from diverse sources // *Problems of Energy and Resource Saving*. 2025. Special Issue No. 88. Pp. 243–249.
8. Kurbonov N.N., Zhang L., Rafikova G.R. Advanced data-driven models and AI algorithms for monitoring and fault diagnosis in large-scale wind power plants // *Proceedings of the Republican Scientific-Technical Conference "Development of Modern Electric Machines and Drives for Green Economy"*, 15–16 May 2025, Tashkent, Uzbekistan. Tashkent, 2025. Pp. 346–348.

ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕГИРУЮЩЕГО СЛОЯ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННОГО ФОСФОРСОДЕРЖАЩЕГО РАСТВОРА В УСЛОВИЯХ БЫСТРОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА

Сулейменова А., Кусайнова А., Нусупов К., Султанов А., Бейсенханов Н.
Казахстанско-Британский Технический Университет, г. Алматы, Казахстан
*e-mail: n.beisenkhanov@kbtu.kz

Введение

Солнечная энергетика — одно из ключевых направлений возобновляемых источников энергии. Среди различных архитектур солнечных элементов кремниевые (Si) солнечные элементы остаются предпочтительным выбором из-за их высокой эффективности и низкой стоимости [1]. Для производства Si солнечных элементов большинство технологий требуют высокотемпературного процесса легирования. Однако широко используемый метод диффузии из паровой фазы POCl_3 остается экологически вредным и дорогостоящим из-за необходимости поддержания соответствующей инфраструктуры. В качестве альтернативы одним из наиболее перспективных подходов является легирование с использованием растворов, который одновременно является простым и экономически эффективным [2,3]. В данной работе представлен рецепт приготовления фосфорсодержащего раствора для оптимизации процесса легирования и повышения эффективности Si солнечных элементов. Изучено влияние температуры, длительности, концентрации и условий предварительной термообработки на свойства плёнок фосфорсиликатного стекла (PSG).

Методы и материалы

Для приготовления раствора смешивались тетраэтоксисилан (TEOS), изопропиловый спирт (IPA), деионизированная вода и ортофосфорная кислота (H_3PO_4) при температуре 70°C.

Пленки PSG наносились методом центрифугирования (1600–4000 об/мин, 30 с) на предварительно очищенные методом RCA Si подложки. Термообработка проводилась при температуре 100–300°C, диффузия фосфора проводилась быстрым термическим отжигом при температуре 900–1050°C. Исследования проводились методом ИК-Фурье спектроскопии (ИКФС) и четырехзондовым методом. Электрические параметры полученных p-n переходов определялись из вольтамперных характеристик (ВАХ). Для формирования простого солнечного элемента наносились электроды оксида индия/олова (ITO) и алюминия (Al).



Рис. 1 – Иллюстрация процесса нанесения покрытия и предварительной термообработки пленок PSG, а также процесса диффузии с использованием быстрого термического отжига

Результаты и Обсуждения

Путем измерения поверхностного сопротивления (R_s) на всей площади Si подложки была построена карта R_s . Согласно полученным данным, R_s легированного слоя находится в узком диапазоне от 100 до 140 $\Omega/\square$. В центральной области результаты R_s менее разбросаны и варьируется от 100 до 120 $\Omega/\square$ (Рис. 2а).

На рисунке 2б представлены ИК-спектры пленок PSG, полученных с использованием фосфорного раствора с различным временем выдержки (0–120 мин). ИК-спектры полученных пленок показали формирование связей P=O, Si–O–Si и Si–O–P [4,5]; что подтверждает внедрение фосфора и успешное формирование PSG плёнки. Стоит отметить, что после 30 мин при 70 °C формируются однородные плёнки. Увеличение выдержки до 4 ч не приводит к изменению спектральных характеристик и морфологии, поэтому для экономии времени было определено оптимальное время — 60 мин.

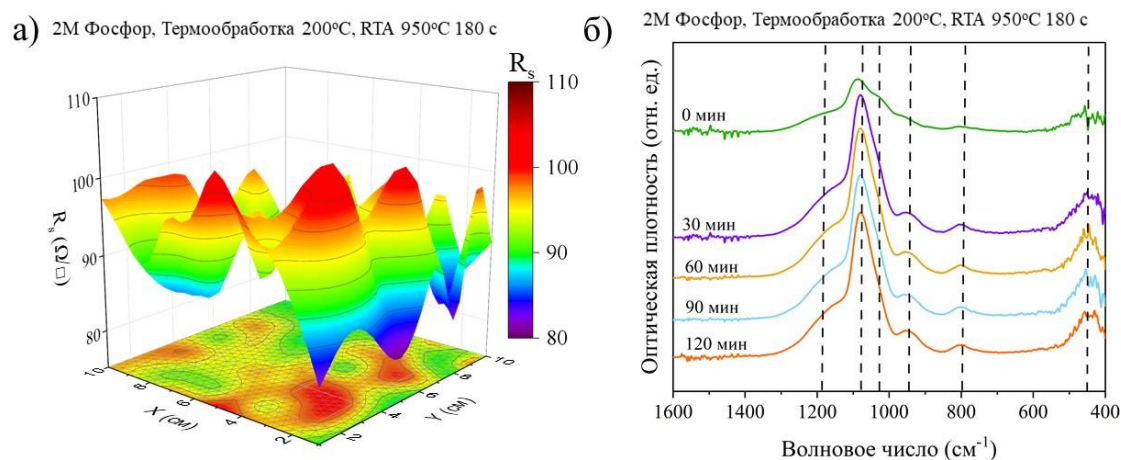


Рис. 2 – (а) Карта R_s по всей поверхности Si пластины, легированной фосфором, (б) ИК-спектры

После проведения быстрого термического отжига измерено R_s , при этом варьировались параметры отжига, концентрации раствора и предварительной термообработки (Рис. 3). Согласно полученным результатам, при температурах выше 950°C снижаются как разброс значений R_s легированного слоя, так и само значение R_s , что связано с более эффективной диффузией фосфора (Рис. 3а). Концентрация фосфора оказывает меньшее влияние, чем температура и длительность отжига (Рис. 3б). С увеличением продолжительности отжига заметно снижается R_s (Рис. 3в). Также было установлено, что температура термообработки пленок PSG до начала диффузии также влияет на значение R_s легированного слоя (Рис. 3г).

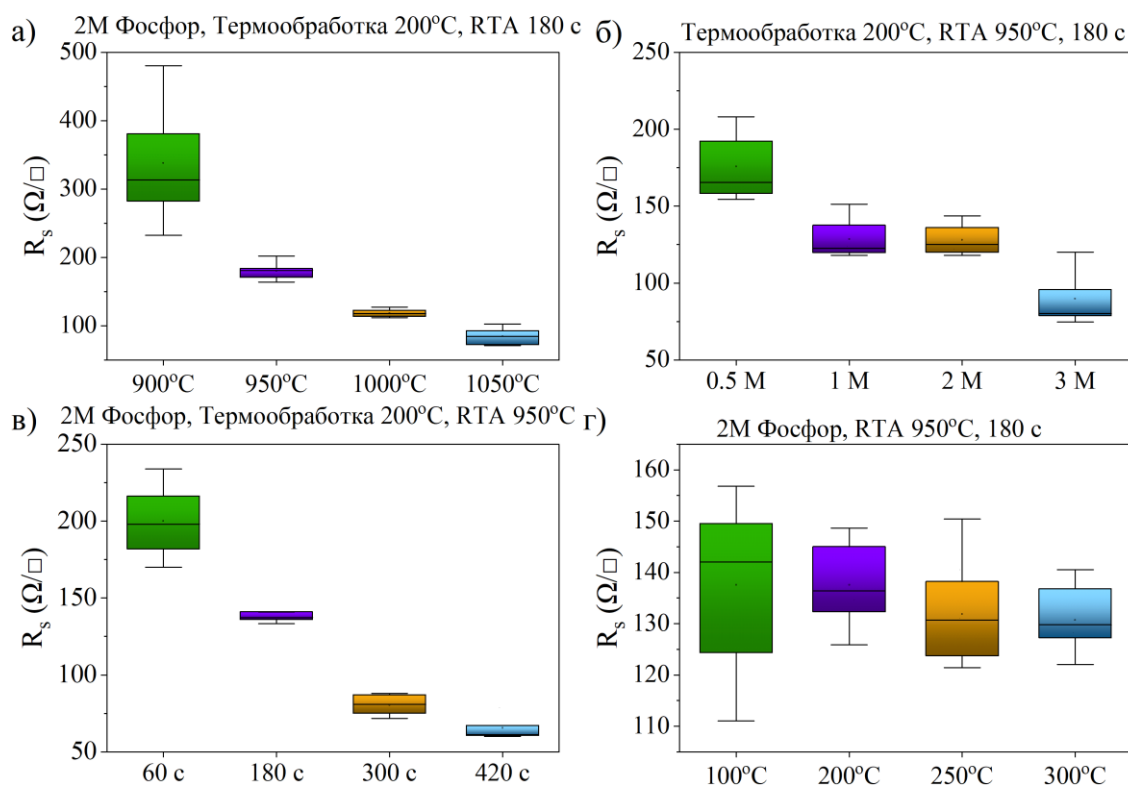


Рис. 3 –Поверхностное сопротивление легированного слоя: (а) при различных температурах отжига, (б) при различных концентрациях фосфорсодержащего раствора, (в) при различной продолжительности отжига, (г) при различных температурах термообработки PSG-плёнок

Было исследовано влияние температуры термообработки (100–300 °C) на свойства PSG-плёнок методом ИКФС (Рис. 4). ИК-спектры PSG-плёнок показали исчезновение пика Si–OH (950 cm^{-1}) при 200–250°C, что указывает на конденсацию структуры (Рис. 4а). С ростом температуры до 300°C спектры фиксировали образование связей P=O (1330 cm^{-1}) [6]. Анализ при различных углах показал, что усиление «плеча» в области 1250–1150 cm^{-1} отражает пористость, которая снижается с ростом температуры. (Рис. 4 (б)–(г)).

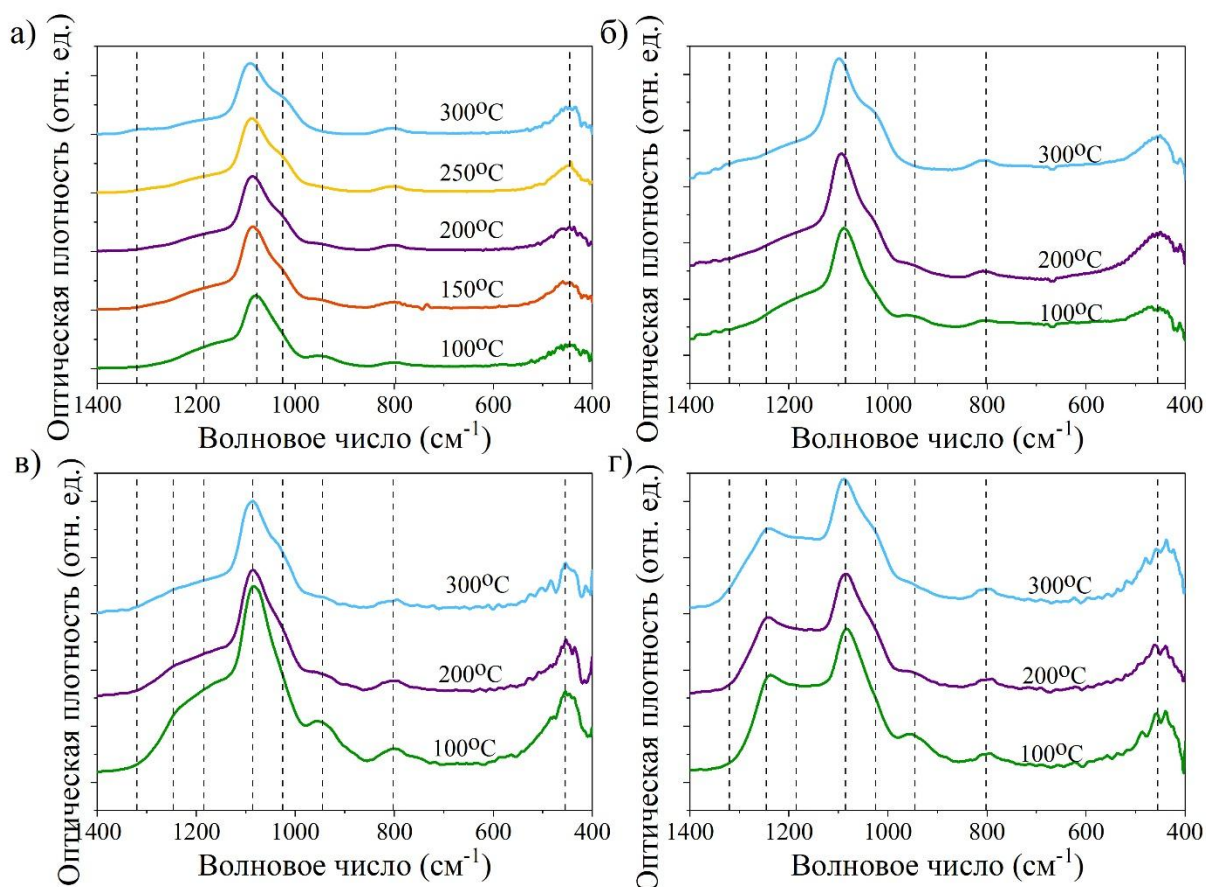


Рис. 4 – (а) ИК-спектры PSG-плёнок при различных температурах термообработки (100–300 °С), (б)–(г) ИК-спектры PSG-плёнок при изменении температуры термообработки, измеренные при углах падения 0°, 30° и 60° соответственно

Также был проведен анализ влияния температуры термообработки PSG-плёнок на формирование п-н переходов и параметры солнечных элементов (Рис. 5а). Повышение температуры пленок PSG увеличивает напряжение холостого хода (V_{oc}) и пороговое напряжение (V_{th}) за счёт снижения рекомбинации, но при 300°C наблюдается рост последовательного сопротивления. Напряжение холостого хода (V_{oc}), плотность тока короткого замыкания (J_{sc}), коэффициент заполнения (FF) изготовленных Si солнечных элементов составляют приблизительно 550 мВ, 28 мА/см² и 80% соответственно. Максимальная эффективность солнечных элементов достигала 12,8% при термообработке PSG пленок при температуре 100°C.

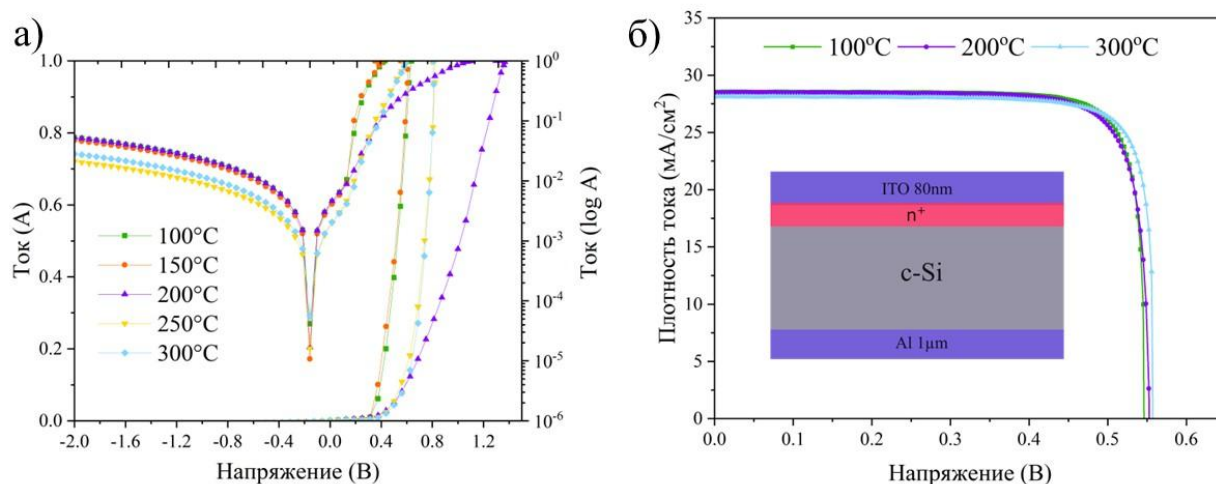


Рис. 5. – (а) ВАХ (тёмные токи) и (б) характеристики плотности тока–напряжение (J–V) Si образцов при различных температурах термообработки PSG-плёнок (100–300 °C)

В данной работе была исследована зависимость внешнего квантового выхода (ВКВ) от длины волны, для образцов подвергавшихся термообработке при температуре 100-300°C (Рис. 6). Кривые представляют высокий ВКВ (до ~90%) в диапазоне 500-800 нм, с постепенным спадом в длинноволновой области. Повышение температуры термообработки положительно влияет на характеристики устройства, улучшая как ВКВ, так и плотность тока.

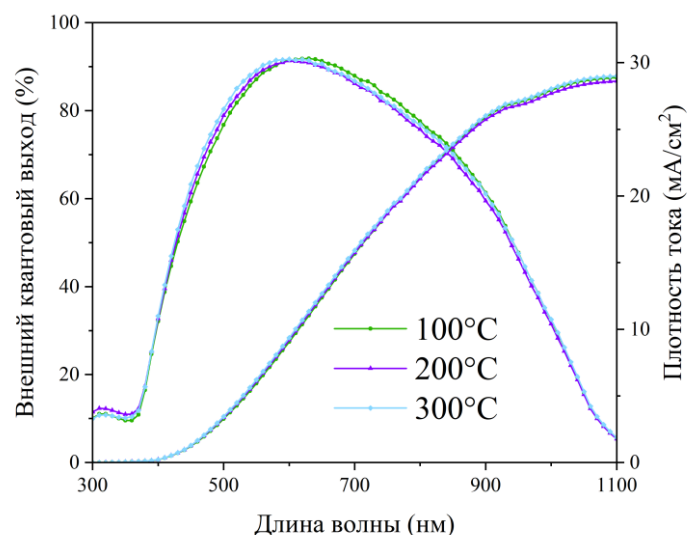


Рис. 6 - Зависимость ВКВ и плотности тока от длины волны при различных температурах термообработки

Результаты подтверждают значительное влияние температуры предварительной термообработки на структуру, легирование и параметры элементов, а метод легирования с использованием растворов может быть альтернативой газовой технологии.

Список литературы

- [1] C. Barri, E. Mafakheri, L. Fagiani, G. Tavani, A. Barzaghi, D. Chrastina, A. Fedorov, J. Frigerio, M. Lodari, F. Scotognella, E. Arduca, M. Abbarchi, M. Perego, M. Bollani, Engineering of the spin on dopant process on silicon on insulator substrate, *Nanotechnology* 32 (2020) 025303. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ABBDDA>.
- [2] Z. Ding, T.N. Truong, H.T. Nguyen, D. Yan, X. Zhang, J. Yang, Z. Wang, P. Zheng, Y. Wan, D. Macdonald, J. Stuckelberger, Boron Spin-On Doping for Poly-Si/SiO_x Passivating Contacts, *ACS Appl Energy Mater* 4 (2021) 4993–4999. <https://doi.org/10.1021/ACSAEM.1C00550>.
- [3] S.M. Ahmad, S.L. Cheow, N.A. Ludin, K. Sopian, S.H. Zaidi, In-depth investigation of spin-on doped solar cells with thermally grown oxide passivation, *Results Phys* 7 (2017) 2183–2193. <https://doi.org/10.1016/J.RINP.2017.06.044>.
- [4] X. Sun, H. Zhao, X. Yuan, H. Tong, Y. Yang, Spin-on boron diffusion for n-type silicon wafers using borate esters of D-mannitol, *Mater Res Express* 6 (2019) 086307. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/AB1A9B>.
- [5] P. Innocenzi, Infrared spectroscopy of sol–gel derived silica-based films: a spectra-microstructure overview, *J Non Cryst Solids* 316 (2003) 309–319. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(02\)01637-X](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(02)01637-X).
- [6] P. Massiot, M.A. Centeno, I. Carrizosa, J.A. Odriozola, Thermal evolution of sol–gel-obtained phosphosilicate solids (SiPO), *J Non Cryst Solids* 292 (2001) 158–166. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(01\)00854-7](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(01)00854-7).

FTAMP 44.29.29

ӨОК 621.316

ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКА ЖҮЙЕСІНДЕ ТҮТІК ТӘРІЗДІ КҮН КОЛЛЕКТОРЛАРЫНЫҢ ИНТЕГРАЦИЯСЫ: ТЕХНИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ЭКОНОМИКАЛЫҚ ТИІМДІЛІКТІ БАҒАЛАУ

***Токпеисова Г.Ш.¹, Онгар Б.¹, Дүйсенбек Ж.С.²**

¹ Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті
(ҚазҰТУ), Алматы қ., Қазақстан

² Ғ.Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

*e-mail: g.tokpeissova@satbayev.university

Аңдатпа: Бұл мақалада электр энергетика жүйесіне түтік тәрізді күн коллекторларын интеграциялау мүмкіндіктері мен оның техникалық және экономикалық тиімділігі қарастырылады. Жаңартылатын энергия көздерін дәстүрлі электр энергетика жүйелерімен үйлестіру қазіргі таңда энергия үнемдеу мен тұрақты даму талаптарына жауап берудің тиімді жолдарының бірі болып отыр. Зерттеу барысында түтік тәрізді күн коллекторларының жылу энергиясын өндіру

қабілеті және оны электр энергиясына түрлендіру технологиялары (мысалы, органикалық Ренкин циклі, бу турбиналары) қарастырылды. Әртүрлі климаттық және жүктеме жағдайларындағы жұмыс режимдері модельденіп, энергетикалық тиімділік (COP, η) пен шығын-табыс көрсеткіштері (LCOE, ROI) есептелді.

Нәтижелерге сәйкес, түтік тәрізді күн коллекторларын электр энергетика жүйесіне біріктіру арқылы энергия шығынын азайтып, көміртегі ізін төмендетуге және жүйенің жалпы тиімділігін арттыруға болады. Бұл жұмыс Қазақстанның оңтүстік өңірлеріндегі нақты климаттық деректер негізінде жүргізілген, сондықтан зерттеу нәтижелері практикалық қолдануға бейімделген.

Түйінді сөздер: Түтік тәрізді күн коллекторы, электр энергетикасы, жаңартылатын энергия, термоэкономикалық тиімділік, интеграция, энергия тиімділігі, LCOE, ROI.

Кіріспе

Электр энергиясын өндіруде қазба отындары - көмір, мұнай және табиғи газ - бірнеше онжылдықтар бойы негізгі энергия көзі ретінде маңызды рөл атқарып келеді. Алайда, қазіргі таңда бұл ресурстардың қолданылуы екі негізгі жаһандық қатерге алып келуде. Біріншіден, қазба отындарын жағу нәтижесінде CO₂ және басқа да парниктік газдардың атмосфераға бөлінуі климаттың өзгеруіне, жаһандық жылынуға және қоршаған ортаның ластануына алып келеді. Екіншіден, бұл ресурстар шектеулі әрі жаңартылмайтын болғандықтан, оларға тәуелді болу энергетикалық қауіпсіздік пен тұрақтылықты әлсіретеді.

Бұл мәселе Қазақстан үшін де айрықша өзекті. Республика қазіргі таңда энергиясының шамамен 70%-ын көмірге негізделген жылу электр станцияларынан өндіреді. Бұл өндіріс құрылымы жоғары көміртек ізімен және төмен энергия тиімділігімен сипатталады. Сонымен қатар, елдің кейбір аймақтарында электр желілері тозған, ал шалғайдағы ауылдық елді мекендерде энергияға қолжетімділік шектеулі күйінде қалып отыр. Осы жағдайлар Қазақстанды энергетикалық трансформация мен жасыл экономикаға көшудің қажеттілігін тікелей алға тартады.

Халықаралық зерттеулерге сәйкес, егер энергия тұтынудың қазіргі үлгілері сақталатын болса, 2050 жылға қарай әлем бойынша жаңартылатын энергияға сұраныс екі есеге дейін артады [1]. Қазақстан бұл жаһандық трендтен шет қала алмайды. Мемлекет үшін күн энергиясы, әсіресе түтік тәрізді күн коллекторлары (ТТКК) сияқты технологиялар - экологиялық, экономикалық және стратегиялық тұрғыдан тиімді балама бола алады.

Зерттеу барысында нақты климаттық және технологиялық параметрлерге негізделе отырып, түтік тәрізді күн коллекторларын электр жүйелеріне интеграциялаудың термодинамикалық тиімділігі мен экономикалық табыстылығы алғаш рет кешенді түрде бағаланды. Сонымен қатар, зерттеу Қазақстан жағдайына бейімделіп жасалғанымен, жалпы жаһандық қолданысқа да бағытталады [2-4].

Соңғы жылдары ТТКК негізіндегі күн жылу жүйелері әлемнің көптеген елдерінде тұрғын үй, өнеркәсіп және ауыл шаруашылығы салаларында кеңінен қолданылып келеді. Зерттеулер көрсеткендей, ТТКК жүйелері кәдімгі жалпақ күн коллекторларына қарағанда жылу тиімділігі бойынша 10–30% жоғары.

Вакуумдық түтік тәрізді күн коллекторларын пайдалану арқылы электр энергиясын өндіру – төмен және орташа температуралы күн жылуын электрге түрлендіретін перспективті әдістердің бірі болып табылады.



1 – сурет. Вакуумдық түтік коллекторлары

1-ші суретте көрсетілгендей, әр түтік екі қабатты әйнектен тұрады, ал олардың арасындағы кеңістік вакууммен толтырылған. Бұл жылу жоғалуын барынша азайтады. Нәтижесінде, күн сәулесі аз түскен, ауа суық кездерде де (көктем, күз, қыс) тиімді жұмыс істейді. Сонымен қатар сыртқы ауа температурасы -20°C немесе одан да төмен болған жағдайда да вакуумдық коллекторлар суды қыздыруы мүмкін. Бұл оларды қысы суық аймақтарда пайдалануға өте қолайлы етеді [5-6]. Вакуумдық түтік әр бағыттан келетін күн сәулесін қабылдай алады (диффузды жарықты қоса алғанда), бұлтты күндері де жұмысын жалғастырады. Вакуум жылу өткізбейді, себебі онда жылу тасымалдайтын ауа молекулалары жоқ. Түтіктің ішкі беті күн сәулесін жұтып, жылу түрінде жинайды. Сыртқы қабат болса, оны қоршаған суық ортадан жақсы оқшауланған, яғни сыртқа жылу шықпайды.

Органикалық Ренкин циклі (ORC) – төмен температуралы жылу энергиясын электр энергиясына айналдыруға мүмкіндік беретін термодинамикалық процесс. Бұл цикл классикалық Ренкин циклінің аналогы болып табылады, бірақ онда жұмысшы дене ретінде су емес, қайнау температурасы төмен органикалық қолданылады.

Процестің негізгі сатылары:

- 1) Жұмысшы дене буландырғышта қыздырылып, буға айналады;
- 2) Бу турбина арқылы өтіп, механикалық жұмыс жасайды;
- 3) Турбина генераторды айналдырып, электр энергиясы өндіріледі;
- 4) Бу конденсацияланып, қайта циклге түседі.

Электр энергиясын өндіру саласында ТТКК негізіндегі жүйелер көбінесе органикалық Ренкин циклі (ORC) арқылы қолданылады. Бұл әдіс төмен және орта температуралы жылу көздерін пайдалану арқылы электр энергиясын алуға мүмкіндік береді. Алайда, бұл жүйелердің техникалық және экономикалық тиімділігі нақты өңірлік факторларға (күн радиациясы, инвестициялық шығындар, техникалық инфрақұрылым) байланысты екені байқалады [7].

Материалдар және әдістер.

Бұл зерттеуде электр энергетика жүйесіне түтік тәрізді күн коллекторларын (ТТКК) интеграциялаудың техникалық және экономикалық тиімділігі есептеу-аналитикалық әдістермен бағаланды. Зерттеу жұмысы бірнеше өзара байланысты кезеңдерден тұрды.

1) Климаттық деректер мен бастапқы параметрлер

Зерттеу үшін Қазақстанның оңтүстік аймағына тән орташа күн радиациясы деректері пайдаланылды:

Орташа күн радиациясы: **5.5–6.0 кВт·сағ/м²/күн;**

Жылдық шуақты күндер саны: **~280 күн;**

Орташа сыртқы температура: **10–18 °C.**

Бұл мәліметтер **Қазгидромет** мәліметтер базасынан алынған.

2) Жүйе конфигурациясы

Зерттеу моделі келесі негізгі компоненттерден тұрды:

Түтік тәрізді күн коллекторы (ТТКК): Вакуумды түтік жүйесі, тиімділігі 65–75%, жұмыс температурасы 120–200 °C.

Мұнда энергия шығыны мүлде жоқ емес, бірақ ол келесі жағдайларда болуы мүмкін (1-ші кесте):

1-кесте. Энергия шығынының әсері

Жағдай	Энергия шығынына әсері
Бұлтты күндерде	Түсетін күн энергиясы азаяды
Желді ауа райы	Коллектор беті суып кетуі мүмкін, бірақ вакуум оқшаулайды
Қатты аязда	Кішкене жылу шығыны болуы мүмкін, бірақ өте төмен деңгейде
Коллектор кірлеп, шаң басып қалса	Жұту қабілеті төмендейді, ПӘК азаяды
Қате монтаж немесе ақау	Жылу тасымалдануында ақау болады

Аспанда бұлттардың болуы күн сәулесінің Жер бетіне тікелей түсуіне кедергі жасайды, нәтижесінде тікелей күн радиациясының ұзақтығы қысқарады. Ал бұлтсыз аспан жағдайында күн радиациясының ұзақтығы мен қарқындылығы едәуір артады (2-3 – кестелер).

2-кесте. Көктем мен жаз айлары үшін Күн сәулесінің ұзақтығы

Айлар	Күннің шығуы, сағ.мин	Уақыттың ұзақтығы, сағ.мин		Күннің батуы, сағ.мин
		басы	соңы	
Сәуір	4.50	6.23	17.36	19.10
Мамыр	3.40	6.47	17.13	20.20
Маусым	2.54	7.05	16.55	21.06
Шілде	3.11	6.56	17.04	20.49
Тамыз	4.15	6.35	17.25	19.45
Қыркүйек	5.33	6.08	17.52	18.27

3-кесте. Күз мен қыс айлары үшін Күн сәулесінің ұзақтығы

Айлар	Уақыттың ұзақтығы, сағ.мин	Күннің батуы, сағ.мин
Қазан	6.48	17.12
Қараша	8.02	15.58
Желтоқсан	8.46	15.14
Қаңтар	8.27	15.33
Ақпан	7.19	16.41
Наурыз	6.09	17.51

Жылу алмастырғыш арқылы **Органикалық Ренкин циклі (ORC - Organic Rankine Cycle) модулі**: Төмен температуралы жылуды электр энергиясына түрлендіруге арналған.

Қазіргі ORC жүйелеріндегі басты мақсат - кеңейткіш (турбина) арқылы алынатын таза қуатты арттыру және бұл үшін сорғы мен салқындатқыш жүйелердің тұтынуын азайту қажет.

Бұл эксперименттер сорғы тұтынатын қуатты және салқындатқыш тұтынатын қуатты ескеріп, ORC жүйесінің кеңейткіш (экспандер) арқылы алынатын таза қуат өндіруін бағалау мақсатында жүргізілді. Қазіргі таңда ORC жүйесіндегі басты мақсат - кеңейткіштің (турбинаның) таза қуат өндірісін барынша арттыру.

Бұл эксперименттер сорғы тұтынатын қуатты және салқындатқыш тұтынатын қуатты ескеріп, ORC жүйесінің кеңейткіш арқылы алынатын таза қуат өндіруін бағалау мақсатында жүргізілді. Қазіргі таңда ORC жүйесіндегі басты мақсат - кеңейткіштің (турбинаның) таза қуат өндірісін барынша арттыру.

$$W_{таза} = W_{кен} + W_{салкын} + W_{сорғы}$$

мұндағы: $W_{таза}$ – ORC максималды таза қуат шығысы; $W_{кен}$ - кеңейткіштің таза қуат шығысы. Бұл - турбина (немесе кеңейткіш) арқылы өндірілетін механикалық/электр қуаты; $W_{салкын}$ - салқындатқыш жүйесінің тұтынатын қуаты. Бу конденсацияланып, сұйық күйге өтеді - бұл үшін конденсаторды суыту жүйесі жұмыс істейді.

$W_{\text{сорғы}}$ - сорғы тұтынатын қуат. Бұл - жұмыс агентін (органикалық сұйықтықты) жоғары қысымға дейін айдау үшін қажет қуат. Көбіне турбина қуатының 3–8%-ын ғана құрайды.

3) Энергетикалық тиімділікті есептеу әдістері

Жүйенің энергетикалық көрсеткіштері келесі формулалар бойынша есептелді:

Жылу энергиясын өндіру:

$$Q = G \cdot A \cdot \eta_{\text{коллектор}} \cdot t$$

мұндағы: Q - өндірілген жылу энергиясы (кВт·сағ), G - күн радиациясы (кВт/м²), A - коллектордың ауданы (м²), $\eta_{\text{коллектор}}$ - күн коллекторының тиімділігі, t - жұмыс уақыты (сағ).

Электр энергиясын өндіру:

$$E = Q \cdot \eta_{\text{ORC}}$$

мұндағы: η_{ORC} - ORC жүйесінің тиімділігі (8–15%).

Электр энергиясын өндіру үшін жылу энергиясын қосымша құрылғы арқылы айналдыру қажет (4-ші кесте):

4-кесте. Электр энергиясын өндіру

Әдіс	Сипаттамасы	Тиімділік
Бу турбинасы	Жылумен суды буға айналдырып, турбинаны айналдыру	Тек үлкен жүйелерге жарамды
Органикалық Ренкин циклі (ORC)	Төмен температурада жұмыс істейтін бу генераторы	Қымбат, күрделі
Термоэлектрлік генератор (TEG)	Температура айырмасынан ток шығарады	Өте төмен тиімділік (~5%)

Вакуумдық коллекторлар жылу өндіруге өте тиімді (ККД ~70–90%). Бірақ бұл жылуды электрге айналдыру кезінде үлкен шығын болады (ККД ~10–20%). Нәтижесінде, жалпы жүйе тиімділігі 10–15% шамасында ғана болады.

4) Экономикалық бағалау әдістері

Экономикалық көрсеткіштер төмендегідей бағаланды:

Өзіндік құн (LCOE):

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{OPEX_t}{(1+t)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+t)^t}}$$

мұндағы: CAPEX — бастапқы инвестициялық шығындар; OPEX — жыл сайынғы операциялық шығындар; E — жыл сайын өндірілетін электр энергиясы; r — дисконт мөлшерлемесі (8–10%); n — жүйенің қызмет ету мерзімі (20 жыл).

Инвестициялық қайтарым мерзімі (ROI):

$$ROI = \frac{\text{Таза пайда}}{\text{Инвестиция көлемі}}$$

Нәтиже және талқылау

Зерттеу нәтижелері түтік тәрізді күн коллекторларын (ТТК) электр энергетика жүйесіне интеграциялау техникалық жағынан да, экономикалық тұрғыдан да тиімді екенін көрсетті. Жүргізілген модельдеу мен есептеулер негізінде жүйенің энергия өндіру қабілеті, тиімділігі мен шығын-табыс қатынастары жан-жақты талданды.

1) Техникалық көрсеткіштер

100 м² ТТК орнатылған жүйе Қазақстанның оңтүстік аймақтарында (мысалы, Шымкент қаласы) орта есеппен:

Күн радиациясы: 5.8 кВт·сағ/м²/күн (орташа);

Жинақталған жылу энергиясы (Q): ≈ 406 кВт·сағ/күн;

ORC жүйесінің тиімділігі: 12–15%;

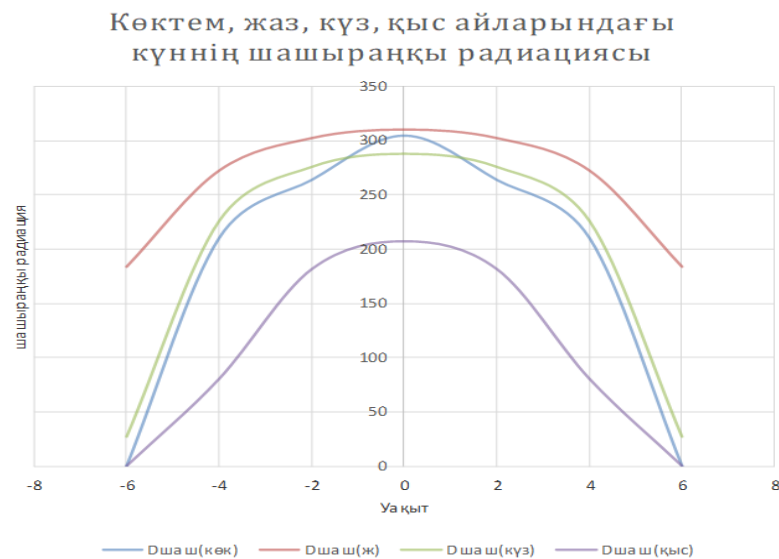
Өндірілген электр энергиясы (E): ≈ 48–60 кВт·сағ/күн;

Жалпы жүйе тиімділігі (η_{жалпы}): 15–18% аралығында.

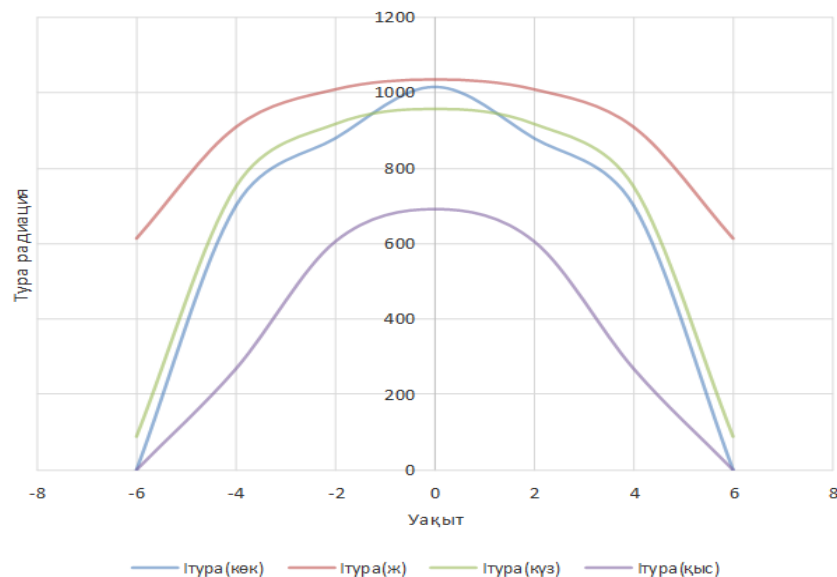
Бұл көрсеткіштер түтік тәрізді күн коллекторларының жоғары жылу тиімділігі мен ORC жүйесінің энергия түрлендіру әлеуетін нақтылайды. Электр энергиясының жылдық өндірілу көлемі **17 000–21 000 кВт·сағ** аралығында болуы мүмкін.

Кіретін радиацияның тек бір бөлігі жер бетіне сіңеді. Сіңірілген сәулеленудің фракциясы жер бетінің (альбедо) шағылысу қабілетіне байланысты болады. Табиғи беттердің альбедосы алуан түрлі болып келеді. Шөппен жабылған жер бетіне түсетін радиацияның 18-20%, үлкен аумақтардың асфальт жабындылары 10-15%, ал жаңадан түскен қардың мөлшері 85-90% құрайды. Жылу кірісі мен тұтыну арасындағы айырмашылық радиациялық теңгерімнің мөлшерін анықтайды. Қарастырылып отырған салада наурыз бен қазан аралығында оң. Мамырдан шілдеге дейін жердің шөпті қабаты бар жылу шығыны тұтырудан айына орта есеппен 10 ккал/см² асып түседі (2 – сурет).

Қалыпты жағдайда күн сәулесінің жалпы мөлшері жылына 80-85 ккал/см² құрайды. Оның ішінде жаз мезгілінде бір айда 15 ккал/см², қыс мезгілінде бір айда 1-3 ккал/см² тең (3 – сурет).



2 –сурет. Әр мезгілдегі күннің шашыраңқы радиациясы
Көктем, жаз, күз, қыс айларындағы
күннің тура радиациясы



3 –сурет. Әр мезгілдегі күннің тікелей келіп түсу радиациясы

2) Экономикалық тиімділік

Экономикалық есептеулер жүйені іске асырудың инвестициялық тартымдылығын растады:

CAPEX (бастапқы инвестиция): 21–25 млн тенге (100 м² жүйе үшін);

OPEX (жылдық шығындар): 375–535 мың тенге;

LSOE (электрдің өзіндік құны): 42.8–64.2 тенге/кВт·сағ;

ROI (инвестицияның қайтарымы): 6–8 жыл.

Бұл LSOE көрсеткіші қазіргі нарықтағы кейбір дәстүрлі электр көздерінен (мысалы, дизель генераторлары) арзанырақ, әрі тұрақты бағамен қамтамасыз

етілу мүмкіндігін береді. Жүйенің ұзақ қызмет ету мерзімі (20 жыл) экономикалық жағынан үнемді шешім екенін дәлелдейді.

3) Экологиялық артықшылықтар

CO₂ шығарындыларының жылдық азаюы: 8–10 тонна;

Қалдықсыз жұмыс: Жанармайсыз жұмыс істейді, шулы емес, күтіп-баптауы оңай

«Жасыл энергетика» қағидаттарына толық сай келеді.

Бұл факторлар әсіресе көмірге тәуелді аймақтарда энергияның экологиялық таза баламасын ұсынуға мүмкіндік береді [8].

Талқылау

ТТКК-ның электр энергетика жүйесіне тиімді интеграциялануы оның келесі ерекшеліктерімен байланысты:

Біркелкі емес күн радиациясына бейімделуі: Вакуумдалған түтікшелер жылу жоғалуын азайтып, жүйені жыл бойы тұрақты жұмыс істеуге бейімдейді;

ORC технологиясының икемділігі: Төмен температурада да жұмыс істей алатын бұл цикл ТТК-ның мүмкіндіктерін тиімді пайдаланады;

Модульдік құрылым: Жүйені масштабтау арқылы түрлі деңгейдегі тұтынушыларға бейімдеуге болады - шағын ауылдардан ірі кәсіпорындарға дейін [9-10].

Алайда, бастапқы инвестиция көлемі жоғары болғандықтан, жоба тиімділігі көбіне мемлекеттік қолдау, субсидиялар, және жасыл тарифтер тәрізді саясаттық құралдарға тәуелді.

Қорытынды.

Зерттеу нәтижелері түтік тәрізді күн коллекторларын (ТТКК) электр энергетика жүйесіне интеграциялау жаңартылатын энергия көздерін тиімді пайдаланудың нақты әрі перспективті жолы екенін көрсетті. Жоғары жылу тиімділігіне ие ТТК жүйесі арқылы органикалық Ренкин циклі (ORC) негізінде электр энергиясын өндіру - әсіресе күн сәулесі мол аймақтар үшін экологиялық таза әрі экономикалық тұрғыдан негізделген шешім болып табылады.

Техникалық модельдеу нәтижесінде жүйенің жалпы тиімділігі 15–18% деңгейінде болса, экономикалық есептеулер бұл жүйелердің өзіндік құны (LCOE) нарықтық деңгеймен бәсекеге қабілетті екенін көрсетті. Сонымен қатар, мұндай жүйелер көміртегі шығарындыларын азайтып, экологиялық тұрақтылықты қамтамасыз етеді және оқшау елді мекендерді энергиямен жабдықтауда тиімді шешім бола алады.

Болашақта мұндай жүйелерді ауқымды түрде енгізу үшін мемлекеттік қолдау механизмдері, «жасыл» тарифтер мен жергілікті өндірісті ынталандыру маңызды рөл атқарады. Сонымен қатар, жылу аккумуляциялау жүйелерін қоса орнату арқылы жыл бойы тұрақты электр өндірісіне қол жеткізуге болады.

Әдебиеттер тізімі

- 1 Ravinder Kumar, Prabhat Tripathi, Bulbul Ongar, Yerkin Khidolda, Zakaria Mohamed Omara, A.S. Abdullah, S. Shanmugan. Experimental study on double effect solar distiller using bioactivity nanoparticles with analysis of thermo-economic and enviro-economical. Case Studies in Thermal Engineering Received 19 February 2023; Received in revised form 16 April 2023; Accepted 4 May 2023.
- 2 Ravinder Kumar, Jayanta Chanda, Ammar H. Elsheikh, Bulbul Ongar, Yerkin Khidolda, Seepana PraveenKumar Hitesh Panchal, S. Shanmugan. Performance improvement of single and double effect solar stills with silver balls/nanofluids for bioactivation: An experimental analysis. SOLAR ENERGY. Received 28 December 2022; Received in revised form 20 April 2023; Accepted 9 May 2023 Volume 259, Page 452-463.
- 3 Б. Онгар, Ж.Ж. Калиев, Н.И. Құлахметов, А. Жақсылық, Ә. Р. Карасаева. Күн фотоэлектр станцияларының перспективті технологиялары мен жұмыс ерекшеліктері. М.Тынышпаев атындағы Қазақ көлік және коммуникациялар академиясының хабаршысы. ISSN 1609-1817. Вестник КазАТК, 121(2), (2022). стр. 315–322.
- 4 Садырбаев Ш.А., Бекбаев А.Б. Исследования и разработка солнечных концентраторов для фотомодулей в условиях города Алматы. Международная конференция «Сатпаевские чтения», май, 2014г., Алматы, Казахстан.
- 5 Койшиев Т.К. Жаңғыртылатын энергия көздері/ Алматы, 2015.
- 6 Токпеисова Г. Ш., Онгар Б., Дүйсенбек Ж. С., Нұртай Ж. Т., Сәбитқызы Б. Атмосфералық суды өндіру технологияларындағы жетістіктер мен күн энергиясының қарқындылығы. Торайғыров университетінің хабаршысы. ISSN 2710-3420. Энергетикалық сериясы. № 2. 2025.
- 7 Zhao, Y.; Liu, G.; Li, L.; Yang, Q.; Tang, B.; Liu, Y. Expansion devices for organic Rankine cycle (ORC) using in low temperature heat recovery: A review. *Energy Convers. Manag.* 2019, 199, 111944.
- 8 Jiménez–Arreola, M.; Wieland, C.; Romagnoli, A. Direct vs indirect evaporation in Organic Rankine Cycle (ORC) systems: A comparison of the dynamic behavior for waste heat recovery of engine exhaust. *Appl. Energy* 2019, 242, 439–452.
- 9 Grigoriev D., Bekbolatova Z., Ongar B., Nygymanova A., Shopaeva, A. Экспериментальное исследование эффективности солнечной системы нагрева воды. Вестник КазАТК, (2024). 131(2), стр. 524–530.
- 10 Qiu G. Selection of working fluids for micro-CHP systems with ORC. *Renewable Energy* 2012; 48:565–70.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ДИАГНОСТИКИ ИНВЕРТОРОВ В КРУПНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Узоков Н.Ч.*, Рахмонов И.У.

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама

Каримова, Ташкент, Узбекистан

*e-mail: uzaqovnavruz81@gmail.com

1 Основной текст

Рост мирового и национального спроса на электроэнергию делает всё более актуальным вопрос перехода на возобновляемые источники энергии. Для Республики Узбекистан, обладающей значительным природным потенциалом в этой сфере, развитие «зелёной» генерации рассматривается не только как инструмент снижения углеродного следа, но и как стратегический фактор обеспечения энергетической безопасности, диверсификации источников энергоснабжения и повышения устойчивости экономики в условиях глобальных климатических вызовов.

Согласно принятым государственным программам и прогнозам, к 2030 году страна намерена увеличить установленную мощность возобновляемых источников энергии до 27 ГВт. Такой шаг позволит не только довести долю «зелёной» энергии в общем объёме производства электроэнергии до 40% и выше, но и сократить выбросы вредных веществ в атмосферу на 34 миллиона тонн, что является серьёзным вкладом в выполнение международных климатических обязательств. При этом исключительно за счёт солнечных электростанций планируется достичь мощности 8,6 ГВт, что станет важнейшей вехой на пути масштабной трансформации национальной энергетики [1,2].

Дальнейшие планы ещё более амбициозны: к 2035 году в Республике Узбекистан общая установленная мощность энергосистемы должна составить 57,1 ГВт, из которых 42,9 ГВт, или более 75%, будут приходиться на возобновляемые источники. В структуре этих мощностей значительную долю займут:

- ветровые электростанции — около 21,1 ГВт, которые будут сосредоточены в регионах с наиболее благоприятными ветровыми условиями (Каракалпакстан, Навоийская, Бухарская области и др.);
- солнечные электростанции — около 18,5 ГВт, размещённые в районах с высоким уровнем солнечной радиации, что позволит использовать природные особенности климата страны максимально эффективно;
- накопительные системы (аккумуляторы) — около 3,3 ГВт, которые обеспечат балансирование нагрузки, сглаживание пиков генерации и повышение надёжности энергоснабжения [3].

Внедрение такого масштаба возобновляемых источников коренным образом изменит энергетический баланс Узбекистана. Традиционные углеводородные

ресурсы будут постепенно вытесняться, сохраняясь преимущественно для регулирующих мощностей и экспортных поставок. В то же время развитие ВИЭ будет сопровождаться цифровизацией управления энергосистемой, внедрением интеллектуальных сетей (Smart Grid), а также систем накопления энергии, что позволит сделать энергетику более гибкой, устойчивой и ориентированной на долгосрочные экологические приоритеты.

Таким образом, планируемое к 2030–2035 годам расширение мощностей возобновляемых источников энергии в Узбекистане свидетельствует о формировании новой модели энергетического развития страны. Эта модель базируется на принципах устойчивости, энергоэффективности и технологических инноваций, что делает её не только важным фактором внутренней энергетической независимости, но и значимым вкладом в глобальные усилия по переходу к низкоуглеродной экономике (см. Рис. 1).

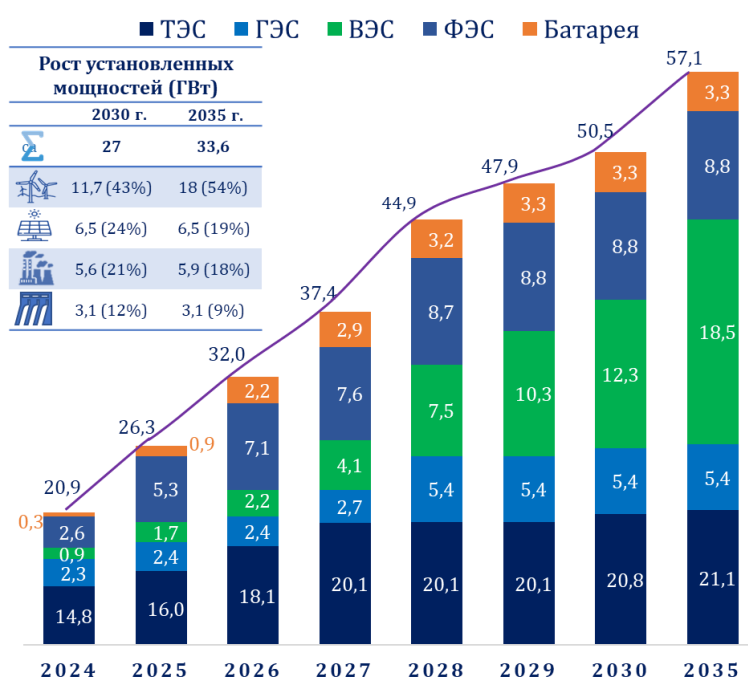


Рис. 1. – Рост установленных мощностей в Узбекистане (ГВт)

Широкомасштабное развитие солнечных электростанций предъявляет повышенные требования к стабильности, надежности и эффективности энергетических систем. Особенно это актуально для централизованных инверторов, которые являются ключевыми технологическими компонентами крупных солнечных электростанций. Они выполняют преобразование постоянного тока (DC), вырабатываемого солнечными панелями, в переменный ток (AC) для подачи в электрическую сеть. Однако долговечность и надежность работы инверторов оказывают прямое влияние на общую эффективность солнечной электростанции[4,5,6].

Для обеспечения надежной и стабильной работы инверторов в составе крупномасштабных солнечных электростанций требуется комплексный подход к мониторингу их технического состояния. В условиях переменной генерации и влияния внешних факторов (температуры, влажности, пылевой нагрузки)

инверторы подвержены ускоренному старению и риску отказов. Эффективным решением данной проблемы является использование цифровых систем диагностики, интегрированных с IoT-сенсорами и централизованными платформами мониторинга. Такая архитектура позволяет в режиме реального времени отслеживать ключевые эксплуатационные параметры, своевременно выявлять аномалии и предотвращать аварийные ситуации. Схематичное представление данной архитектуры показано на рисунке 2.

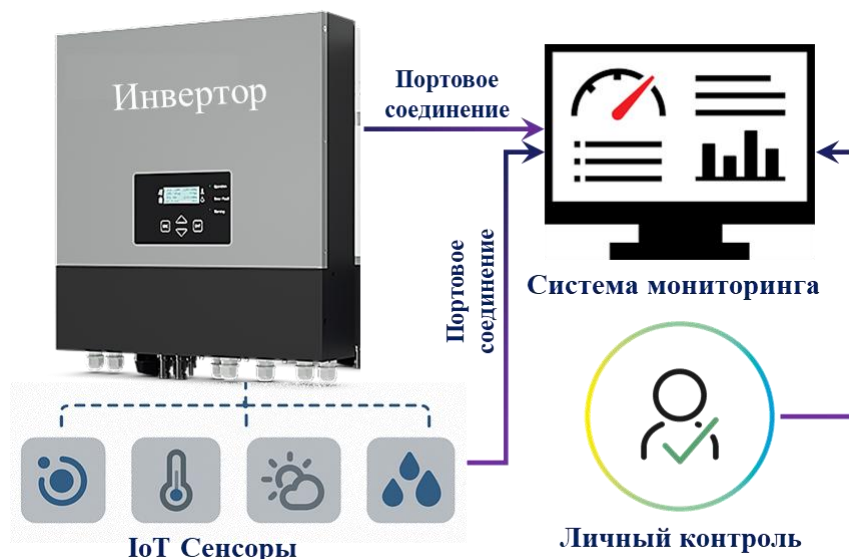


Рис. 2. – Блок-схема динамического анализа факторов, влияющих на надёжность инверторов в крупномасштабных солнечных электростанциях

На рисунке 3 представлена блок-схема динамического анализа факторов, влияющих на надёжность инверторов в крупномасштабных солнечных электростанциях. В центре системы расположен инвертор, выполняющий преобразование постоянного тока, вырабатываемого фотоэлектрическими модулями, в переменный ток, подаваемый в сеть. Для обеспечения стабильности его работы применяются IoT-сенсоры, которые фиксируют ключевые эксплуатационные параметры: электрические характеристики, температуру, влажность и климатические условия. Собранные данные поступают через портовое соединение в систему мониторинга, где они обрабатываются, визуализируются и сопоставляются с нормативными критериями. Система мониторинга позволяет отслеживать текущие параметры работы, выявлять аномалии и прогнозировать возможные отказы, что значительно повышает эффективность эксплуатации оборудования. Завершающим элементом архитектуры выступает личный контроль оператора, который на основе полученных данных принимает управленческие решения и корректирует режимы эксплуатации. Таким образом, блок-схема иллюстрирует замкнутый контур управления надёжностью инвертора, основанный на интеграции цифрового мониторинга, интеллектуальных сенсоров и человеческого контроля, что обеспечивает высокую устойчивость и надёжность функционирования солнечных электростанций[7].

Алгоритм динамического мониторинга и анализа факторов, влияющих на надёжность инверторов, начинается со сбора данных от сенсоров (рис.4). На основе полученной информации формируется показатель надёжности, который отражает текущее состояние оборудования во времени. Далее определяется набор контролируемых параметров, и каждый из них последовательно анализируется. Для каждого параметра рассчитывается индекс состояния. Если его значение выше установленного порогового уровня, параметр считается исправным, и проверка продолжается. Если же индекс оказывается ниже порога, система фиксирует потенциальную неисправность и формирует предупреждение о необходимости технического обслуживания. Таким образом обеспечивается плановый контроль за состоянием оборудования.

Вторая часть алгоритма работает в режиме реального времени. Для каждого параметра фиксируется текущее значение и оценивается его отклонение от нормы. Если отклонение находится в допустимых пределах, система продолжает функционировать без изменений. При превышении допустимых границ принимаются корректирующие меры — либо система сохраняет рабочий режим с ограничениями, либо включаются механизмы компенсации, например, перераспределение мощности или использование резервных ресурсов. Дополнительно оценивается запас времени работы оборудования в текущем состоянии. Если резерв достаточен, параметры пересчитываются и система обновляется в новом рабочем режиме. Если же ресурса недостаточно, формируется аварийное уведомление и инвертор переводится в безопасный режим[8,9].

Таким образом, алгоритм объединяет два уровня управления: плановую оценку надёжности и оперативное реагирование на критические изменения. Такой подход позволяет своевременно выявлять аномалии, предупреждать отказы и повышать общую устойчивость работы солнечных электростанций.

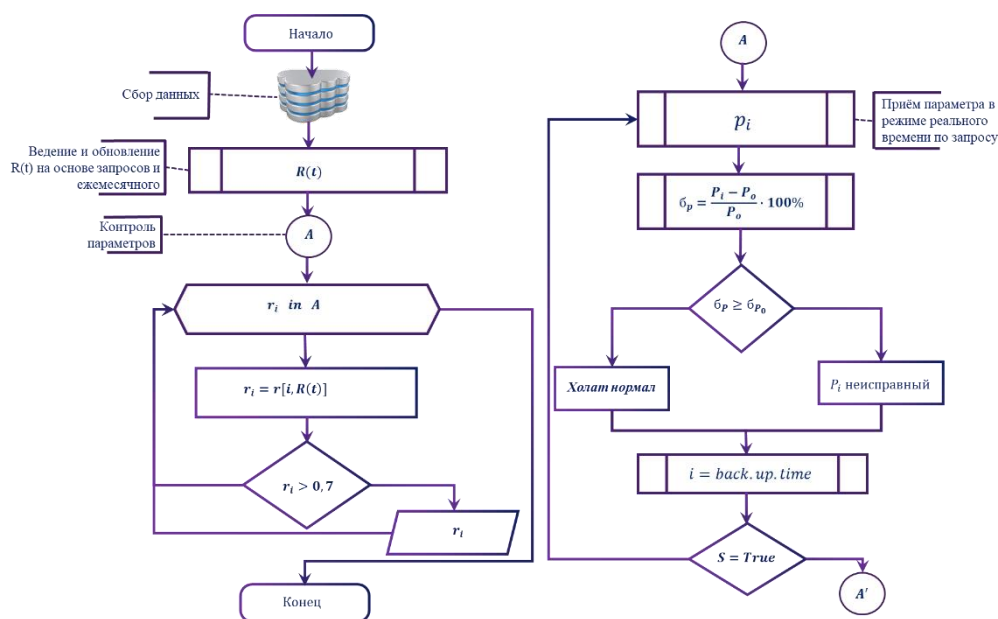


Рис. 3. – Алгоритм динамического мониторинга и анализа факторов, влияющих на надёжность инверторов в крупномасштабных солнечных электростанциях

Выполненное исследование показало, что устойчивое развитие возобновляемой энергетики в Узбекистане напрямую связано с внедрением современных технологий мониторинга и управления. Масштабное строительство солнечных и ветровых электростанций требует особого внимания к надёжности ключевых элементов энергетической инфраструктуры, прежде всего инверторов.

Разработанная архитектура мониторинга с применением IoT-сенсоров и цифровых платформ позволяет в режиме реального времени фиксировать критически важные эксплуатационные параметры, своевременно выявлять аномалии и предотвращать потенциальные отказы. Введение алгоритма динамического анализа обеспечивает сочетание плановой оценки надёжности и оперативного реагирования на критические изменения, что создаёт условия для повышения эффективности эксплуатации, продления срока службы оборудования и снижения эксплуатационных рисков[10].

Таким образом, интеграция технологий цифрового мониторинга, интеллектуальной диагностики и человеко-машинного контроля формирует многоуровневую систему управления надёжностью инверторов в крупных солнечных электростанциях. Это способствует повышению устойчивости энергосистемы, обеспечивает её соответствие современным требованиям энергоэффективности и создаёт основу для долгосрочного развития низкоуглеродной энергетики в Республике Узбекистан.

Список литературы

1. Wang J., Rakhmonov I.U., Atajiyev Sh.M. Long-term performance analysis of centralized inverters and key factors influencing their reliability // Problems of Energy and Resource Saving. 2025. Special Issue No. 88. Pp. 224–229.
2. Rakhmonov I.U., Wang J. Current status analysis of monitoring and reliability enhancement of centralized inverters in utility scale solar // Proceedings of the Republican Scientific-Technical Conference "Development of Modern Electric Machines and Drives for Green Economy", 15–16 May 2025, Tashkent, Uzbekistan. Tashkent, 2025. Pp. 123–126.
3. Wang J., Rakhmonov I.U., Wang G. Analysis of the long-term operational efficiency of centralized inverters and identification of factors affecting their reliability improvement // Proceedings of the Republican Scientific-Technical Conference "Development of Modern Electric Machines and Drives for Green Economy", 15–16 May 2025, Tashkent, Uzbekistan. Tashkent, 2025. Pp. 413–416.
4. Rakhmonov I.U., Reymov K.M., Shayumova Z.M. The role information in power management tasks//E3S Web Conf. Volume 139, 2019. Rudenko International Conference "Methodological problems in reliability study of large energy systems" (RSES 2019) 01080. 1-3 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901080>.
5. Rakhmonov I.U., Nematov L.A., Niyozov N.N., Reymov K.M., Yuldoshev T.M. Power consumption management from the positions of the general system theory

// Journal of Physics: Conference Series. ICMSIT-2020. 1515 (2020) 022054 doi:10.1088/1742-6596/1515/2/022054.

6. Уколова Е.В., Воропай Н.И. Развитие метода backward/forward для исследования гибкости систем электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. № 2 (46). С. 24-35.

7. Герасимов Д.О., Суслов К.В. Системы имитационного моделирования мультиэнергетических объектов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. № 4 (48). С. 11-19.

8. Капанский А.А. Методы решения задач оценки и прогнозирования энергетической эффективности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. № 2 (42). С. 103-115.

9. Performance analysis of grid-connected PV systems // Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference. – Dresden, Germany, 2006. – P. 4–8.

10. Li T., Tao T. S., Zhang R., Liu Z., Ma L., Sun J., Sun Y. Reliability evaluation of photovoltaic system considering inverter thermal characteristics // Electronics. – 2021. – Vol. 10. – Art. 1763. – DOI: 10.3390/electronics10151763.

UDC 66.669

INTERMETALLIC COMPOUNDS FOR HYDROGEN STORAGE: A REVIEW OF STRUCTURAL, KINETIC, AND CATALYTIC ASPECTS WITH A FOCUS ON PD–TI–MG SYSTEMS

Kurbanbekov Sh.R.¹, Skakov M.K.², Zhakiyeva A.Ye.^{2*}, Tshe V.K.¹, Kaldar B.S.¹, Amangeldieva Y.O.¹

¹International Kazakh-Turkish University named after Khoja Ahmed Yasawi

²East Kazakhstan University named after Sarsen Amanzholov

e-mail: zhakiyeva96@mail.ru

Introduction

The development of hydrogen storage technologies is a key area of focus in the context of the formation of a sustainable hydrogen energy. Metal hydride materials are considered as one of the most promising due to their high storage density, the reversibility of sorption processes, and the safety of operation, which have been widely studied over the past 70 years [1] due to their promising volumetric capacity for H₂ and their reversible, mild operating conditions of temperature and pressure [2-3]. For this reason, the characterization of intermetallic compounds can rely on extensive literature and numerous experimental and theoretical studies conducted to date. Even the prototyping and modeling of integrated storage and energy systems based on intermetallic compounds have been extensively researched [4].

Metal hydrides can provide high capacity at much lower pressures, allowing for the use of cost-effective tank components. Since weight is relatively unimportant for stationary storage, a wide range of materials can be considered. Indeed, several intermetallic metal hydrides have long been studied as attractive candidates for stationary H₂ storage applications [5-6]. However, low cost is of utmost importance for practical grid-scale storage, and many of these compounds contain elements that are not commonly found. Hydrogen storage in intermetallic compounds is achieved by forming hydride phases during H₂ absorption.

The aim of this article is to conduct a comprehensive analysis of intermetallic compounds as hydrogen storage materials, with a focus on Pd–Ti–Mg systems, including their structural, kinetic, and catalytic features. The article aims to investigate the mechanisms of sorption–desorption using experimental and modeling approaches, and to evaluate the impact of the architecture of nanostructured composites and thin-film coatings on the capacity, kinetics, and stability of the systems in practical applications.

The latter includes a crystal structure transition that must be characterized by suitable methods, including conjugate X-ray and neutron diffraction methods, to determine the crystallographic properties of the metal sublattice and the location of H. H storage intermetallic compounds can be divided into three main groups: AB₅, AB₂, and AB.

AB₅ compounds have been tested for H storage since the 1970s [7], and they include RE lanthanides in position A and late PMs such as Fe, Co, Ni, and Cu in position B. They exhibit high reversible capacity, good cyclability, good kinetics, and resistance to impurities, as well as fast activation. However, their main drawback is that they can disproportionate during cycling, resulting in the formation of constituent elements. In addition, they are often based on RE materials, which are critical raw materials [8-9].

AB₂ compounds include A = Zr, Ti, Y, La, and B = V, Cr, Mn, Fe, Ni, and exhibit good H storage capacity, fast formation/decomposition kinetics, and easy activation. However, since the constituent elements are expensive, their production is costly. They also have lower impurity tolerance and structural stability compared to AB₅ compounds.

Finally, AB compounds were the first to be discovered and tested for H storage back in 1958 [10]. They are based primarily on A = Ti, Zr, and B = Fe, Co, and Ni, and are of interest for practical applications due to their low cost (except for Co) and limited availability of critical raw materials. They can store H at pressures and temperatures close to atmospheric conditions, while maintaining good kinetics and capacity. The main disadvantages are related to the harsh activation conditions, sensitivity to poisoning, and the possibility of repeated hydrogenation, which can limit their capacity in a narrow range of pressures.

Among various materials, Pd–Ti–Mg-based systems are of particular interest, as they combine the catalytic properties of palladium, the structural stability of titanium, and the high hydrogen-storage capacity of magnesium. Studying the sorption–

desorption isotherms and modeling these processes is an important area for developing effective materials and predicting their behavior under real-world conditions.

The Pd–Ti–Mg intermetallic system is considered as a promising direction in the field of hydrogen storage, as it combines the high hydrogen capacity of magnesium (up to 7.6 wt.% H₂), the catalytic ability of Pd to dissociate molecular hydrogen, and the structural and catalytic role of Ti. The main hydride, MgH₂, has a high enthalpy of formation and requires temperatures above 300 °C for desorption, which limits its practical application [11]. The introduction of Pd in the form of thin coatings or nanoparticles ensures rapid decomposition of molecular hydrogen and transport of atomic hydrogen into Mg, eliminating the main kinetic barrier [12]. Ti in such systems plays a dual role: on the one hand, it forms defective structures and TiH₂ nuclei that accelerate hydrogen diffusion, and on the other hand, it acts as an oxygen getter, increasing the system's resistance to oxidation [13]. Multilayer thin-film architectures of Pd/Ti/Mg have been extensively studied, where the Pd cap protects the surface from passivation and accelerates the kinetics, while the Ti buffer reduces interfacial interactions and stabilizes the structure, resulting in significantly faster hydrogenation rates compared to pure Mg [14]. Similar effects are observed in nanocomposites obtained by mechanical alloying and decorated with Pd, where an optimal combination of capacitance and kinetics is achieved [15]. However, there are still key limitations: the high desorption temperature of MgH₂ persists despite improved kinetics, the cost of Pd hinders the scaling of the technology, and cycling may cause degradation of the structure due to phase interdiffusion and the formation of new compounds [16]. Nevertheless, optimizing the architecture of layers with minimal Pd content, using Ti as a buffer and catalytic element, and developing nanostructured powder composites make the Pd–Ti–Mg system promising for creating medium-capacity hydrogen storage modules [17].

To achieve optimized physical and chemisorption of hydrogen, the thicknesses of thin films of Ti, Mg, Pd nanoparticles were investigated in the COMSOL Multiphysics software. In Fig. 1, the distribution of the surface electric displacement field over thin films of Ti, Mg, Pd nanoparticles (NPs) in a gas chamber at a specific displacement voltage (0.5 V) for another medium (air, H₂) can be observed. This shows that providing a fixed potential voltage at the boundaries of the test chamber creates a surface charge density that varies depending on the gas environment of the chamber and the thickness of the thin film of nanoparticles. From Fig. 1. (a, c), it can be seen that the surface charge density (color-coded) increases from hydrogen to air for a thin film of 3/3/3 nm Pd/Mg/Ti nanoparticles. During hydrogenation, a hydride is formed, which increases the resulting resistance [18]. Due to the differences in the hydrogen absorption coefficients of the sensitive materials and the synergistic catalytic interface at the nanoscale [19-20], more significant differences (H₂, air) were observed in the surface charge density for Pd/Mg/Ti with a thickness of 6/6/6 nm (Fig. 1 (b, d)). The maximum charge density between the layers of thin nanoparticle films can be increased due to the increased hydrogen absorption rate due to the optimized catalytic interface. However, with a greater thickness of thin nanoparticle films, maximum agglomeration

and alloy formation will occur, which may not be ideal for achieving maximum catalytic effect.

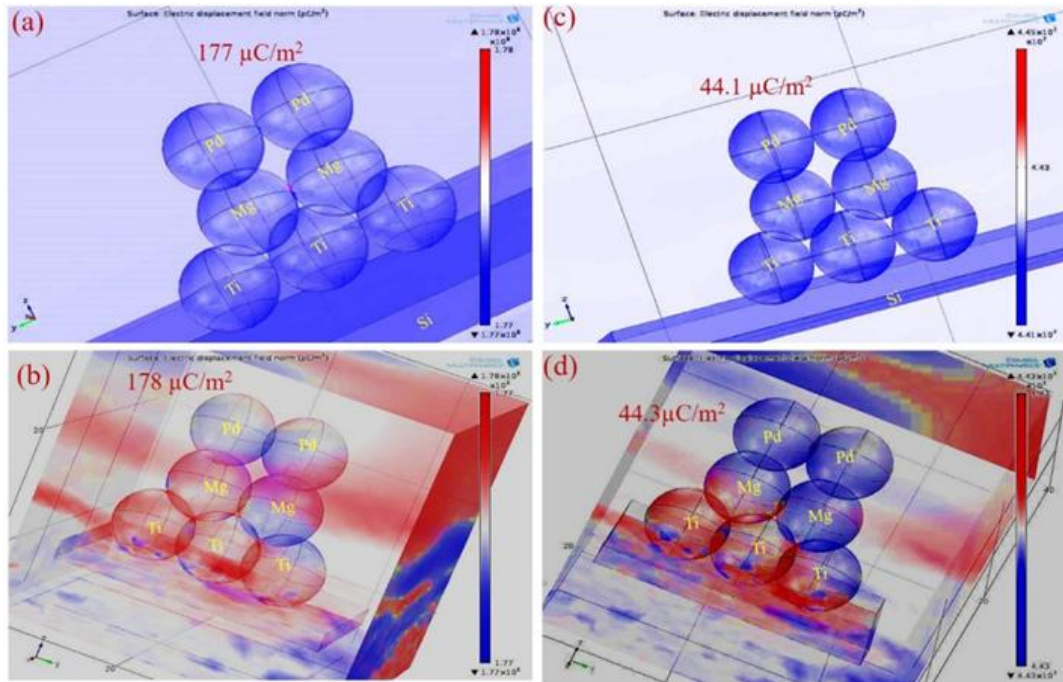


Fig. 1. – Computational analysis (a, c) for Pd/Mg/Ti nanoparticles (3/3/3 nm) in air, H₂, (b, g) for Pd/Mg/Ti nanoparticles (6/6/6 nm) in air, H₂, respectively.

Kinetics studies focus on the quantitative interpretation of reaction rates and the factors that influence them. Early studies on the kinetics of the pure Mg-H₂ system focused on first-order reaction models, second-order reaction models, two-dimensional compression region, three-dimensional diffusion, and Jander diffusion. Due to the slow diffusion of hydrogen in the MgH₂ phase, it is believed that Mg hydrogenation is best described by a three-dimensional diffusion-controlled shrinking volume model [21]. As more doped systems have been studied, alternative kinetic models have been proposed to analyze the kinetic behavior of Mg-based hydrides [22]. Despite debates and disagreements, kinetic analysis has been recognized as a useful tool for Mg-based systems [23]. This section will summarize and discuss the kinetic models and analytical methods commonly used for kinetic analysis. Essentially, the reaction progress in a solid-gas system is defined as the conversion fraction ξ ($0 \leq \xi \leq 1$), which is a function of the reaction time t and the rate constant k , as shown in Equation (1):

$$\xi = f(k, t) \quad (1)$$

The rate constant k is defined as the ratio of the specific rate to the rate coefficient and is a function of temperature. This rate constant k varies with temperature T according to the Arrhenius equation (2):

$$\ln k = -E_a/RT + \ln A \quad (2)$$

In this relationship, the activation energy can be calculated using the Arrhenius plot, which is $\ln k$ versus $1/T$. As mentioned above, the activation energy (E_a) for the catalyzed Mg/MgH_2 can be considered as a useful scale for evaluating the effectiveness of the catalyst. More importantly, kinetic analysis can not only calculate (E_a) and the rate constant k , but also provide insights into the reaction mechanisms. As shown in Table 1, kinetic models can be divided into two categories: isothermal models, which are based on the analysis of isothermal hydrogen absorption or desorption curves ($\xi-t$); and non-isothermal models, which are based on ($\xi-t$) curves typically obtained by linearly increasing the temperature (using TGA or differential scanning calorimetry (DSC) methods).

Model	Kinetic equation
Johnson-Meyla-Avrami (JMA)	$\ln(-\ln(1-\xi))=\ln(k)+n\ln(t)$
Jander's diffusion model (JMD)	$(1-(1-\xi)^{1/3})^2=kt$
One-dimensional diffusion	$\xi^2=kt$
Two-dimensional diffusion (two-dimensional particle shape)	$(1-\xi)\ln(1-\xi)+\xi=kt$
Three-dimensional diffusion (Ginsling-Brownstein model)	$(1-2\xi/3)-(1-\xi)^{2/3}=kt$
Two-dimensional compression area	$1-(1-\xi)^{1/2}=kt$
Three-dimensional compression volume	$1-(1-\xi)^{1/3}=kt$

Conclusion

The development of hydrogen storage technologies remains one of the most important areas in the development of sustainable hydrogen energy. Metal hydride materials, particularly intermetallic compounds, have demonstrated significant potential due to their high volumetric capacity, reversible sorption processes, and safe operation. The AB_5 , AB_2 , and AB systems have been studied to assess the advantages and limitations of these compounds based on their composition, cost, and cycling stability. Despite significant progress in their research, the challenge of finding the optimal combination of capacity, kinetics, and durability remains relevant.

Special attention is paid to Pd-Ti-Mg -based systems, where it is possible to combine the catalytic properties of Pd , the structural stability of Ti , and the high hydrogen-storage capacity of Mg . It has been shown that multilayer nanostructures and powder composites provide higher hydrogenation rates and degradation resistance compared to pure Mg . However, the problems of high MgH_2 desorption temperatures and high Pd costs remain unresolved. The use of Ti buffer layers, the minimization of Pd content, and the optimization of nanoparticle thickness significantly enhance the catalytic effect and stability of the system.

The analysis of sorption-desorption kinetics confirms that the choice of reaction model (JMA, JMD, diffusion, and compression models) plays a key role in the interpretation of experimental data. The construction of the Arrhenius dependence allows not only to calculate the activation energy and the rate constant, but also to gain

a deeper understanding of the mechanisms of hydrogen interaction with the material. These approaches provide a foundation for the rational design of new hydrogen systems with improved characteristics.

In general, further development of hydrogen storage technologies in intermetallic compounds requires a comprehensive approach that includes experimental research, modeling, and the development of new material architectures. The optimization of Pd–Ti–Mg systems, as well as the search for alternative low-cost catalysts that can provide efficient desorption at moderate temperatures, opens up prospects for the creation of practical medium-power hydrogen storage modules, making them competitive in the future hydrogen energy sector.

Literature

1. Libowitz, G. G., Hayes, H. F., & Gibb, T. R. P. (1958). The system zirconium–nickel and hydrogen. *Journal of Physical Chemistry*, 62(1), 76–79. doi:10.1021/j150559a019
2. El Kharbachi, A., et al. (2020). Metal hydrides and related materials: Energy carriers for novel hydrogen and electrochemical storage. *Journal of Physical Chemistry C*, 124(14), 7599–7607. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c01806?ref=pdf>
3. Bannenberg, L. J., et al. (2020). Metal (boro-) hydrides for high energy density storage and relevant emerging technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(50), 33687–33730. 10.1016/j.ijhydene.2020.08.119
4. Dematteis, E. M., Barale, J., Corno, M., Sciullo, A., Baricco, M., & Rizzi, P. (2021). Solid-state hydrogen storage systems and the relevance of a gender perspective. *Energies*, 14(19), 6158. <http://dx.doi.org/10.3390/en14196158>
5. Hirscher, M., et al. (2020). Materials for hydrogen-based energy storage—past, recent progress and future outlook. *Journal of Alloys and Compounds*, 827, 153548. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153548>
6. Pasquini, L., Sakaki, K., Akiba, E., Allendorf, M. D., Alvares, E., Ares, J. R., Babai, D., Baricco, M., Bellosta von Colbe, J., Berezniysky, M., et al. (2022). Magnesium- and intermetallic alloys-based hydrides for energy storage: Modelling, synthesis and properties. *Progress in Energy*, 4(3), 032007. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ac7190>
7. Zijlstra, H., & Westendorp, F. F. (1969). Influence of hydrogen on the magnetic properties of SmCo₅. *Solid State Communications*, 7(12), 857–859. 10.1016/0038-1098(69)90427-X
8. European Commission. (2017). Commission’s communication on the 2017 list of critical raw materials for the EU (COM 490). Brussels: European Union.
9. European Commission. (2020). Critical raw materials resilience: Charting a path towards greater security and sustainability (COM 474). Brussels: European Union.
10. Shen, C., Jia, Y., Xu, C., Hu, S., Zhou, X., & Long, X. (2022). Adsorption and diffusion behavior of hydrogen on the M-doped (M = Zr, Mo, Y, Cu, Pd, Ir, Mg, Al, Si) Ti(0001) surfaces: A first-principles study. *Surface Science*, 721, 122149. <https://doi.org/10.1016/j.susc.2022.122149>

11. Berlouis, L. E. A., Honnor, P., Hall, P. J., Morris, S., & Dodd, S. B. (2006). An investigation of the effect of Ti, Pd and Zr on the dehydriding kinetics of MgH_2 . *Journal of Materials Science*, 41(20), 6403–6408. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0732-1>
12. Li, J., Li, B., Shao, H., Li, W., & Lin, H. (2018). Catalysis and downsizing in Mg-based hydrogen storage materials. *Catalysts*, 8(3), 89. <http://dx.doi.org/10.3390/catal8020089>
13. Zhang, X., Liu, Y., Hu, J., Gao, M., & Pan, H. (2020). Empowering hydrogen storage performance of MgH_2 by nanoengineering and nanocatalysis. *Materials Today Nano*, 9, 100064. <https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2019.100064>
14. Yartys, V., Lototsky, M., Akiba, E., Albert, R., Antonov, V., Ares, J., Baricco, M., Bourgeois, N., Buckley, C., von Colbe, J. B., et al. (2019). Magnesium based materials for hydrogen based energy storage: Past, present and future. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(15), 7809–7859. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.212>
15. Xie, X., Chen, M., Hu, M., Wang, B., Yu, R., & Liu, T. (2019). Recent advances in magnesium-based hydrogen storage materials with multiple catalysts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(22), 10694–10712. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.237>
16. Zhang, J., Li, Z., Wu, Y., Guo, X., Ye, J., Yuan, B., Wang, S., & Jiang, L. (2019). Recent advances on the thermal destabilization of Mg-based hydrogen storage materials. *RSC Advances*, 9(7), 408–428. <https://doi.org/10.1039/C8RA05596C>
17. Si, T., Cao, Y., Zhang, Q., Sun, D., Ouyang, L., & Zhu, M. (2015). Enhanced hydrogen storage properties of a Mg–Ag alloy with solid dissolution of indium: A comparative study. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(17), 8581–8589. [10.1007/s12598-018-1174-z](https://doi.org/10.1007/s12598-018-1174-z)
18. Gross, K. J., et al. (2012). Recommended best practices for the characterization of storage properties of hydrogen storage materials (US DOE Hydrogen Program document V3.34).
19. Heo, T. W., Colas, K. B., Motta, A. T., & Chen, L.-Q. (2019). A phase-field model for hydride formation in polycrystalline metals: Application to δ -hydride in zirconium alloys. *Acta Materialia*, 181, 262–277. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2019.09.047>
20. Shi, R., Heo, T. W., Wood, B. C., & Wang, Y. (2020). Critical nuclei at hetero-phase interfaces. *Acta Materialia*, 200, 510–525. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2020.09.012>
21. Janot, R., Cuevas, F., Latroche, M., & Percheron-Guégan, A. (2006). Influence of crystallinity on the structural and hydrogenation properties of Mg_2X phases (X = Ni, Si, Ge, Sn). *Intermetallics*, 14(2), 163–169. <http://dx.doi.org/10.1016/j.intermet.2005.05.003>
22. Denys, R. V., Riabov, A. B., Černý, R., Kovalchuk, I. V., & Zavaliy, I. Y. (2012). New CeMgCo_4 and Ce_2MgCo_9 compounds: Hydrogenation properties and

crystal structure of hydrides. Journal of Solid State Chemistry, 187(1), 1–6.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.jssc.2015.05.024>

23. Shtender, V. V., Denys, R. V., Paul-Boncour, V., Verbovytsky, Y. V., & Zavaliy, I. Y. (2015). Effect of Co substitution on hydrogenation and magnetic properties of NdMgNi₄ alloy. Journal of Alloys and Compounds, 639, 526–532.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.03.187>

ӘОЖ 44.41.35:

ФОТОВОЛЬТАИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІҢ ЖҰМЫСЫН БҰЛТТЫ АУА РАЙЫНДА БАҒАЛАУ: ЭКСПЕРИМЕНТТІК ӨЛШЕУЛЕР МЕН ЦИФРЛЫҚ МОНИТОРИНГ НӘТИЖЕЛЕРІ

Жақсылық Н.Н.¹, Скаков М.К.², Генч Н.^{1,3} Чорух А.⁴, Раманкулов Ш.Ж.¹

¹ Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
Түркістан қ., Қазақстан

² Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,
Өскемен қ., Қазақстан

³ Ялова университети, Ялова қ., Түркия

⁴ Сакарья университети, Сакарья қ., Түркия

*e-mail: nurkozha.zhaksylyk@gmail.com

1 Кіріспе

Бүгінгі таңда жаңартылатын энергия көздерін тиімді пайдалану — энергия қауіпсіздігі мен орнықты дамудың негізгі бағыттарының бірі. Әсіресе, фотоэлектрлік (ФЭ) жүйелердің түрлі климаттық жағдайлардағы жұмысын зерттеу олардың нақты тиімділігін бағалауға және болашақта энергия өндіруді болжауға мүмкіндік береді. Қазақстан жағдайында күн радиациясының маусымдық және бұлттылыққа байланысты өзгерістері фотоэлектрлік қондырғылардың тұрақсыздығына әсер ететін негізгі факторлардың бірі болып табылады. Сондықтан эксперименттік өлшемдер мен сандық мониторинг деректеріне сүйене отырып, ФЭ жүйелердің нақты жұмысын талдау өзекті ғылыми мәселе ретінде қарастырылады. Зерттеудің мақсаты — бұлтты ауа райында жарықтықтағы өзгерістерді жергілікті эксперименттік өлшемдер арқылы тіркеу және алынған нәтижелерді SOLARMAN Smart платформасының қуат және энергия көрсеткіштерімен салыстыру арқылы фотоэлектрлік жүйелердің өнімділігін бағалау.

Бұл тәсіл атмосфералық қолайсыз жағдайларда фотоэлектрлік жүйелердің төзімділігі мен тиімділігін кешенді бағалауға мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде энергия шығымын болжау мен жүйе жобалауын оңтайландыру үшін маңызды [1]. Тұрақты энергетикалық шешімдерге деген жаһандық сұраныстың артуы күн

энергиясын басты жаңартылатын ресурс ретінде алға шығарды, ал фотоэлектрлік панельдер күн сәулесін электр энергиясына айналдыруда маңызды рөл атқарады [2]; [3]. Алайда бұл жүйелердің жұмыс тиімділігі мен қуат шығымы метеорологиялық жағдайларға, әсіресе күн радиациясын әлсірететін бұлттылыққа айтарлықтай тәуелді [4]. Бұл әлсіреу қуат өндірудің төмендеуіне әкеліп, желіге қосу және энергияны басқару саласында елеулі қиындықтар туғызады [5]. Айнымалы жағдайларда фотоэлектрлік жүйелердің жұмысын дәл бағалау — олардың тиімді орналастырылуы мен ұзақ мерзімді тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін өте маңызды [6]. Бұл жағдай ФЭ жүйелердің бұлтты кезеңдердегі жағдайын эмпирикалық өлшемдер мен заманауи сандық мониторинг әдістерін біріктіре отырып кешенді түрде бағалауды қажет етеді [7]; [8]. Осы зерттеу теориялық болдаулар мен практикалық нәтижелер арасындағы алшақтықты жоюға бағытталған және түрлі ФЭ модульдер технологияларының нақты ашық ауа жағдайларындағы, әсіресе бұлтты ауа райындағы өнімділігіне эмпирикалық дәлел келтіреді. Талдау барысында күн радиациясы, ұяшық температурасы және электрлік шығыс параметрлері егжей-тегжейлі өлшеніп, модульдің тиімділігі мен қуат коэффициенті әртүрлі аспан жағдайларында, соның ішінде тығыз бұлттылық кезінде сипатталады. Сонымен қатар, зерттеу сандық мониторинг платформаларын пайдалана отырып уақыттық деректерді жинайды, бұл өткінші бұлттардың туындататын қуат ауытқуларын егжей-тегжейлі талдауға мүмкіндік береді [9]; [10].

Зерттеудің мақсаты – бұлтты ауа райында жарықтылықтың өзгерісін жергілікті эксперименттік өлшеулер арқылы тіркеп, алынған нәтижелерді SOLARMAN Smart платформасының қуат және энергия көрсеткіштерімен салыстыра отырып, фотовольтаикалық жүйелердің жұмысын бағалау.

2 Әдебиеттік шолу

Күн энергиясының үзілісті сипаты, әсіресе ауа райының өзгеруіне байланысты ауытқушылығы, энергия өндірісінің орташа есеппен 25% төмендеуіне әкеліп соқтыратын 10%-дан 70%-ға дейінгі қуат шығындарына себеп болады [11]. Бұл ауытқушылық фотоэлектрлік модульдердің нақты емес жағдайлардағы, мысалы, ішінара көлеңке немесе ауыспалы радиация жағдайындағы өнімділігін дәл бағалауға арналған сенімді әдістемелердің қажеттілігін көрсетеді [12]; [13]. Бұл, өз кезегінде, ФЭ жүйелердің динамикалық реакциясын нақты сипаттау үшін жетілдірілген мониторинг пен талдау тәсілдерін қолдануды қажет етеді, өйткені модульдер мен инверторлардың тиімділігі күнделікті радиацияның көлемі мен өзгергіштігіне тікелей байланысты [14]; [15]. Сондықтан, ФЭ жүйелердің жұмыс өнімділігіне қоршаған ортаның ауа райы жағдайлары мен энергия тұтыну үлгілерінің әсерін түсіну, әсіресе желіге қосылмаған қондырғылар үшін, өте маңызды. Мысалы, Гана өз энергетикалық теңгерімін әртараптандыру және қоршаған ортаға әсерді азайту мақсатында күн фотоэлектрлік технологияларына елеулі инвестициялар салды. Бұл бағытта Bui Power Authority компаниясы жүзеге асырған 50 МВт қуатты күн электр

станциясы ерекше үлгі бола алады [16]. Алайда, тропиктік климат жағдайларындағы, яғни жиі бұлтты ауа райы орын алатын аймақтардағы ФЭ жүйелердің жұмысын сипаттайтын жан-жақты зерттеулер әлі де шектеулі. Бұған дейінгі зерттеулерде температура мен шаң-тозаңның ФЭ өнімділігіне әсері қарастырылғанымен, бұлтты ауа райы кезеңдерінде эксперименттік өлшемдер мен заманауи сандық мониторингті біріктіре отырып, жүйенің жұмыс динамикасын толық сипаттайтын кешенді талдау әлі де қажет [17]. Бұл зерттеу аталған олқылықтың орнын толтырып, бұлтты ауа райындағы фотоэлектрлік жүйенің жұмысын қатаң бағалайды және жүйенің мұндай күрделі жағдайда қалай жұмыс істейтінін тұтас түсіндіруге бағытталған. Атап айтқанда, мақала әртүрлі ФЭ технологиялардың диффузды радиация мен тез өзгеретін радиация деңгейіне қалай әрекет ететінін зерттейді, бұлтты ауа райына тән негізгі факторлар ретінде [18]. Сонымен қатар, жұмыс атмосфералық құбылыстардың, мысалы, ауаның ылғалдылығы мен жел жылдамдығының шаң жиналуына қалай әсер ететінін және оның бұлтты кезеңдердегі өнімділікке жанама әсерін зерттейді [19].

3 Әдістеме

Бұл зерттеудің әдіснамасында эксперименттік бақылау мен сандық бақылау және корреляциялық талдауды біріктіретін кешенді тәсіл қолданылды. Бұл бөлімде бұлтты ауа райындағы ФЭ жүйелердің жұмысын бағалауға арналған эксперименттік құрылғы, өлшеу хаттамалары мен деректерді талдау әдістері сипатталады.

Эксперименттік өлшемдер үшін Vernier Go Direct Light and Color Sensor құрылғысы қолданылды. Бұл құрал қоршаған ортадағы жарық қарқындылығын, RGB спектралдық қарқындылықты және ультракүлгін-көк диапазонды тіркеуге қабілетті. Сенсордың тұрақты тік бағытта орналасуын қамтамасыз ету үшін 3D басып шығару арқылы арнайы штатив жасалды (Сурет 1). Бұл конфигурация бұлттылық өзгерістеріне байланысты спектралдық және жарық қарқындылығы өлшемдерінің дәлдігі мен тұрақтылығын қамтамасыз етті.



Сурет 1. – Жарықтылықтың уақыт бойынша өзгерісін анықтайтын Vernier датчигі және 3D притерден шыққан штатив.

Деректерді жинау 2025 жылғы 13 қыркүйекте жергілікті уақыт бойынша 10:45 пен 13:45 аралығында үздіксіз жүргізілді және Vernier Graphical Analysis бағдарламасы арқылы жарық қарқындылығының уақыт бойынша өзгеруі

графикалық түрде бейнеленді. Фотоэлектрлік құрылғылардың спектралдық сезімталдығы, әдетте «пайдалы үлеспен» (Useful Fraction) сипатталып, ауа массасы мен ашықтық индексіне тікелей байланысты, бұлттылық әсерінен спектрлік өзгерістердің маңыздылығын көрсетеді (Daxini et al., 2022).

Эксперименттік зерттеу қуаты 25 кВт болатын желіден тәуелсіз күн электр станциясында (КЭС) жүргізілді. Бұл станция SOLARMAN Smart сандық мониторинг платформасына қосылған, ол нақты уақыттағы жұмыс параметрлерін тіркеуге мүмкіндік береді. Эксперимент уақытында талданған негізгі параметрлерге күн панельдерінің шығыс қуаты, айнымалы ток күші және уақыт бойынша өндірілген энергия мөлшерінің өзгерісі кірді. Екі дереккөзден алынған графиктерді салыстыру арқылы жарықтылық пен фотоэлектрлік жүйенің қуат шығымы арасындағы корреляция анықталды. Бұл корреляциялық талдау, әсіресе бұлттылықтан туындайтын жарық қарқындылығының өзгерістері нақты электр энергиясы өндірісіне қалай әсер ететінін тікелей бағалауға мүмкіндік беріп, динамикалық атмосфералық жағдайда жүйе тиімділігін сипаттау үшін маңызды мәліметтер берді.

4 Нәтижелер

2025 жылғы 13 қыркүйекте 10:45–13:45 аралығында жүргізілген эксперимент барысында үш түрлі дерек көзі пайдаланылды: Vernier Go Direct Light and Color датчигі арқылы алынған жарықтылық мәндері (Сурет 2.), сондай-ақ SOLARMAN Smart платформасынан алынған айнымалы ток қуаты, өндірілген энергия және тұрақты ток көрсеткіштері (Сурет 3, Сурет 4).

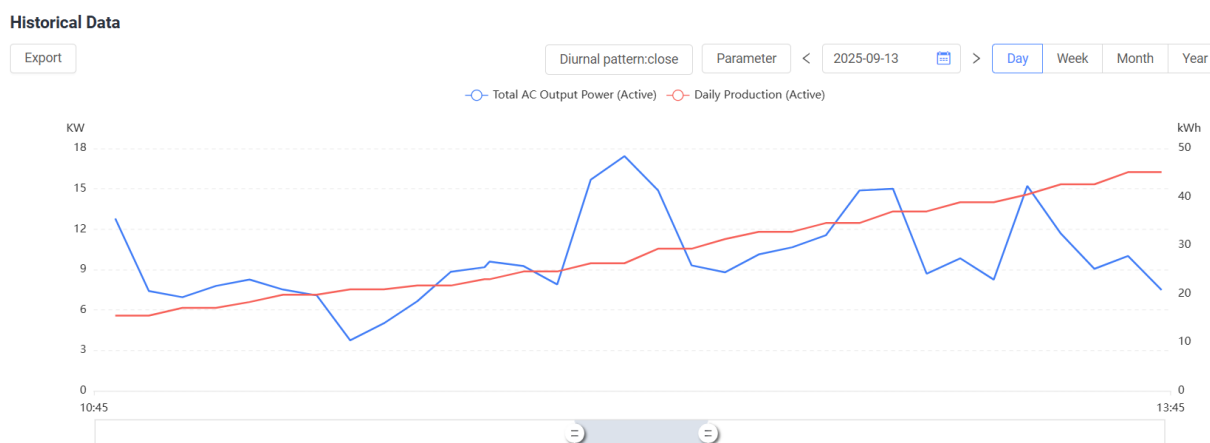


Сурет 2. - Vernier Graphical Analysis бағдарламасындағы жарықтылықтың уақыт бойынша өзгеріс графигі (1-сурет)

12:45–13:30 аралығында жарықтылық графигінде қысқа мерзімді жиі шыңдар тіркелді. Бұл құбылыстар бұлт жиегінің әсерімен (cloud-edge effect) түсіндіріледі. Дегенмен, SOLARMAN Smart платформасындағы қуат пен ток көрсеткіштерінде мұндай өткір импульстер байқалмай, тек салыстырмалы түрде

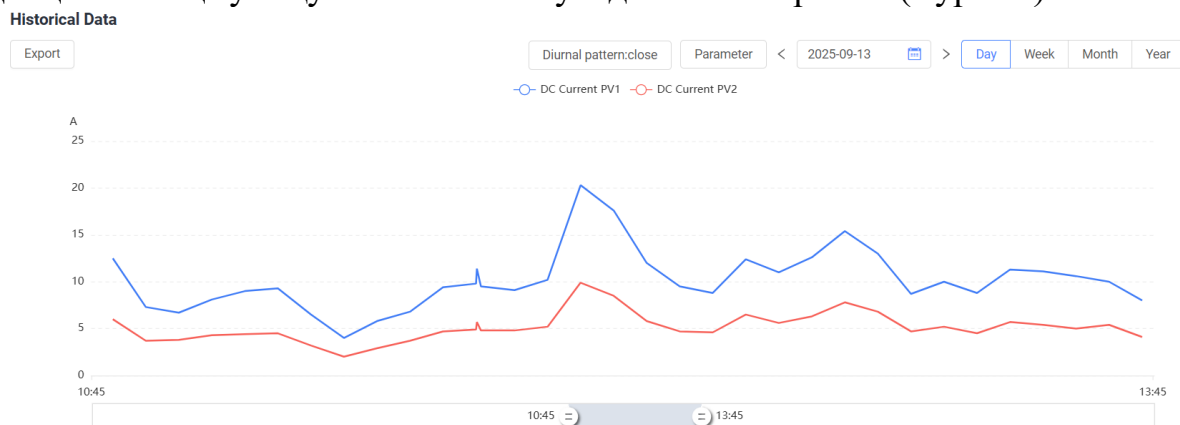
бірқалыпты флуктуация ғана көрінді. Бұл айырмашылық Vernier датчигінің жоғары уақыттық дискретизациясымен және PV-инвертордың қуатты тегістейтін алгоритмдерімен түсіндіріледі.

SOLARMAN Smart платформасынан алынған айнымалы токтың жалпы шығыс қуаты жарықтылық өзгерістеріне сәйкес құбылып отырды. Бұлттылық күшейген кезде қуаттың 3.74 кВт деңгейіне дейін төмендеуі, ал күн ашық сәттерде 17.42 кВт шамасына дейін артуы байқалды. Энергияның жиынтық өндірісі уақыт өте тұрақты түрде өскенімен, бұлтты интервалдарда оның өсу қарқыны бәсеңдеп, күн радиациясы артқан кезеңдерде қайтадан жылдамдады (Сурет 3.).



Сурет 3. - Шығыс қуаты мен энергия өндірісінің уақыт бойынша өзгерісі.

Жалпы күн электр станциясы қуаты 580 Вт болатын 45 панельден тұрады, 30 және 15 панельден екі каналға бөлінген. Инверторға қосылған екі массивтің ток көрсеткіштері (DC Current PV1 және PV2) жарықтылық өзгерістерін толық қайталады. PV1 желісінде ток күші 20.3 А-ға дейін жетсе, PV2 желісінде орташа 9.9 А диапазонында болды. Бұл айырмашылық панельдердің санына байланысты. Жалпы алғанда, екі тізбектегі токтың синхронды құбылуы күн радиациясының ауытқуына тікелей тәуелді екенін көрсетті (Сурет 4).



Сурет 4. – Екі канал бойынша тұрақты ток күшінің уақыт бойынша өзгерісі.

Үш түрлі параметрді (жарықтылық, қуат, ток) талдау олардың арасында айқын байланыс бар екенін көрсетті. Жарықтылық төмендегенде қуат пен ток азайды, ал жарық күшейгенде электрлік параметрлер де өсті. Дегенмен, жарықтылықтағы қысқа мерзімді импульстер PV жүйенің электрлік мәндерінде толық көрінбеді.

5 Қорытынды

Бұл зерттеу бұлтты ауа райының күрделі жағдайларында фотоэлектрлік жүйелердің жұмыс өнімділігін кешенді түрде бағалауға бағытталды. Жергілікті жарықтық өлшемдерін SOLARMAN Smart платформасынан алынған нақты уақыттағы операциялық деректермен біріктіре отырып, атмосфералық өзгергіштік жағдайында ФЭ жүйелерді түсінудегі маңызды олқылықты жою көзделді. Әдістеме нақты эксперименттік бақылау мен сандық жүйелік деректерді біріктіріп, күн радиациясының ауытқуы мен ФЭ қуат шығымының арасындағы тікелей байланысты анықтауға мүмкіндік берді.

Эксперимент нәтижелері бұлттылықтың фотоэлектрлік жүйелердің өнімділігіне елеулі әсер ететінін айқын көрсетті. Vernier Go Direct Light and Color Sensor тіркеген жарық қарқындылығы бұлтты кезеңдерде бірнеше минут ішінде шамамен 60 000 люкстен 10 000–15 000 люкс деңгейіне дейін күрт төмендеді. Бұл ауытқулар фотоэлектрлік жүйенің электрлік шығысында тікелей көрініс тапты: айнымалы токтың жалпы қуаты ашық сәттерде 17.42 кВт деңгейінде болса, бұлттылық артқан кезде 3.74 кВт-қа дейін төмендеді. Инверторға қосылған екі тізбектен алынған айнымалы және тұрақты ток көрсеткіштері де жарықтықтағы өзгерістермен толық сәйкес келді. Жалпы энергия өндіру көлемі біртіндеп артып отырғанымен, бұл өсім бұлтты интервалдарда айтарлықтай баяулап, тек күн радиациясы жақсарған кезде қайта жеделдеді. Ең маңыздысы — айтарлықтай ауытқуларға қарамастан, ФЭ жүйе энергия өндіруді үздіксіз жалғастырды, бұл оның төзімділігін көрсетті, бірақ сонымен бірге бұлттылық салдарынан күн радиациясының төмендеуі энергия өндіру қарқынына айтарлықтай шектеу қоятынын көрсетті.

Қорытындылай келе, бұл зерттеу бұлттылықтың фотоэлектрлік жүйелердің негізгі электрлік параметрлеріне тікелей және айтарлықтай әсерін эмпирикалық түрде дәлелдеді. Жарық қарқындылығының эксперименттік өлшемдерін кешенді сандық мониторинг деректерімен біріктіре отырып, жарық жағдайларындағы өзгерістердің нақты қуат өндіріске қалай әсер ететінін көрсеттік. Бұл нәтижелер ФЭ жүйелердің тиімділігі мен төзімділігін бағалау тұрғысынан маңызды, әсіресе атмосфералық жағдайлар жиі өзгертін аймақтарда. Мұндай түсінік энергия шығымын болжауды нақтылауға, күрделі климаттық жағдайларға бейімделген ФЭ жүйелерді жобалауға және күн энергиясының ұзақ мерзімді тұрақтылығын қамтамасыз етуге елеулі үлес қосады. Болашақ зерттеулер спектрлік өзгерістер мен жылдам радиациялық ауытқуларды есепке алатын жетілдірілген болжау модельдерін әзірлеуге бағытталуы мүмкін, бұл айнымалы климат жағдайында энергия өндіру тиімділігін арттыруға жол ашады.

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (ЖТН «АР23488947»).

Әдебиеттер тізімі

1. Obukhov, S., Плотников, И. А., Surzhikova, O. A., & Savkin, K. (2017). Method for Prediction of the Power Output from Photovoltaic Power Plant under Actual Operating Conditions. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 189, 12008. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/189/1/012008>
2. Balachandran, P. K., Kumar, C. V. V., B, P. N., Thanmayi, M., & Sunil, K. S. (2024). Analyzing the Outdoor Performance of Different Types of PV Module Technologies. E3S Web of Conferences, 547, 3004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454703004>
3. Mcingani, I., Meyer, E. L., & Overen, O. K. (2024). The Impact of Ambient Weather Conditions and Energy Usage Patterns on the Performance of a Domestic Off-Grid Photovoltaic System. Energies, 17(19), 5013. <https://doi.org/10.3390/en17195013>
4. Bošnjaković, M., Stojkov, M., & Zlatunić, B. (2021). Experimental Testing of PV Module Performance. *Tehnički Glasnik*, 15(1), 127. <https://doi.org/10.31803/tg-20200718142815>
5. Hassan, M. A., Bailek, N., Bouchouicha, K., Ibrahim, A., Jamil, B., Kuriqi, A., Nwokolo, S. C., & El-kenawy, E. M. (2022). Evaluation of energy extraction of PV systems affected by environmental factors under real outdoor conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, 150, 715. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04166-6>
6. Krishna, A. R., Kumar, A. V., Krushna, A. G., Shanmugapriyan, J., & Keertana, C. (2024). The Study of Solar and Wind Power Systems under Different Weather Conditions. E3S Web of Conferences, 547, 3009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454703009>
7. Gaaloul, Y., Kechiche, O. B. H. B., Oudira, H., Chouder, A., Hamouda, M., Silvestre, S., & Kichou, S. (2025). Faults Detection and Diagnosis of a Large-Scale PV System by Analyzing Power Losses and Electric Indicators Computed Using Random Forest and KNN-Based Prediction Models. *Energies*, 18(10), 2482. <https://doi.org/10.3390/en18102482>
8. Tajjour, S., & Chandel, S. S. (2023). Experimental investigation of a novel smart energy management system for performance enhancement of conventional solar photovoltaic microgrids. *Discover Energy*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s43937-023-00021-5>
9. Silverman, T. J. (2023). Photovoltaic Reliability Workshop (PVRW) 2023 Proceedings: Posters. OSTI OAI (U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information). <https://www.osti.gov/biblio/2229734>
10. Touati, F., Khandakar, A., Chowdhury, M. E. H., Gonzales, A. S. P., Sorino, C. K., & Benhmed, K. (2020). Photo-Voltaic (PV) Monitoring System, Performance Analysis and Power Prediction Models in Doha, Qatar. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92632>

11. Salazar-Peña, N., Tabares, A., & González-Mancera, A. (2024). Ai-Powered Dynamic Fault Detection and Performance Assessment in Photovoltaic Systems. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4934156>
12. Kumari, N., Singh, S. K., Kumar, S., & Jadoun, V. K. (2024). Performance analysis of partially shaded high-efficiency mono PERC/mono crystalline PV module under indoor and environmental conditions. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72502-z>
13. Ramkiran, B., Sudhakar, K., & Sundarabalan, C. K. (2021). Effect of Dust and Shadow on Performance of Solar Photovoltaic Modules: Experimental Analysis. *Energy Engineering*, 118(6), 1827. <https://doi.org/10.32604/ee.2021.016798>
14. Santiago, I., Esquivel-Martin, J. L., Trillo-Montero, D., Real-Calvo, R., & Pallarés-López, V. (2021). Classification of Daily Irradiance Profiles and the Behaviour of Photovoltaic Plant Elements: The Effects of Cloud Enhancement. *Applied Sciences*, 11(11), 5230. <https://doi.org/10.3390/app11115230>
15. Li, B., Chen, X., & Jain, A. (2024). Enhancing Power Prediction of Photovoltaic Systems: Leveraging Dynamic Physical Model for Irradiance-to-Power Conversion. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2402.11897>
16. Yakubu, R. O., Ijeoma, M. W., Yusuf, H., Abdulazeez, A. A., Acheampong, P., & Carbajales-Dale, M. (2024). Performance Analysis of a 50 MW Solar PV Installation at BUI Power Authority: A Comparative Study between Sunny and Overcast Days. *Electricity*, 5(3), 546. <https://doi.org/10.3390/electricity5030027>
17. El-wahhab, G. G. A., Abdelwahab, T. A. M., Osman, Y. K. O. T., Abuhussein, M. F. A., Fodah, A. E. M., & Ali, K. A. M. (2023). Performance evaluation of solar panels under different dust accumulation conditions using thermography: focusing on PV temperature variation. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 12(3), 247. <https://doi.org/10.1007/s40243-023-00246-3>
18. Poudel, B., Guruwacharya, N., Subedi, S., Tamrakar, U., Wilches-Bernal, F., Rekabdarkolae, H. M., Hansen, T. M., & Tonkoski, R. (2024). Experimentation in Exploring Photovoltaic Inverter Dynamics Under Different Irradiance Levels through a Data-Driven Approach. *IEEE Access*, 12, 164137. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3488493>
19. Khan, M. A. Z., Wahab, A., Ali, F., Ahmad, N., Kamran, M. A., & Hassan, A. (2023). Performance of solar roof top panels with disparate particulate accumulation: Exergy analysis on an indoor lab study. *PLoS ONE*, 18(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291018>

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ «АРКАЛЫК» 50 МВт

Жұбанов А.М., Нигматуллин.Р.М.

Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева

e-mail: ar.zhubanov@aues.kz

1 Введение

В статье рассматривается электрическая часть ветроэлектростанции (ВЭС) «Аркалык» установленной мощностью 50 МВт, расположенной в Костанайской области Республики Казахстан. Особое внимание уделено особенностям построенной одно трансформаторной подстанции с головным трансформатором мощностью 63 МВА. Подобное проектное решение противоречит действующим нормативам Республики Казахстан, где предъявляется требование резервирования трансформаторной мощности на объектах генерации [1]. Выполнен анализ возможных рисков эксплуатации такой схемы, рассмотрены климатические условия района (суровый климат, район ветровой активности 4–5, район гололёда 5) [2], а также логистические особенности поставки оборудования из Китая через ближайший пограничный переход «Хоргос».

ВЭС «Аркалык» мощностью 50 МВт будет введена в конце 2025 года в эксплуатацию в Костанайской области и будет подключена к энергосистеме через одно трансформаторную подстанцию 35/110 кВ. Основное оборудование силового трансформатора и сам трансформатор 63 МВА поставлен из Китая и по маршруту через пограничный переход «Хоргос». Схема одно трансформаторной подстанции на генерирующем объекте оптимизирует затраты, но в то же время противоречит требованиям «Правил технической эксплуатации» и правилам «KEGOC», которые предусматривают установку двух трансформаторов для повышения надёжности [1,3,4].

2 Цели и задачи исследования

Цель исследования – провести комплексный анализ электрической части ВЭС «Аркалык» мощностью 50 МВт, выявить несоответствия действующим нормативным требованиям, оценить риски эксплуатации одно трансформаторной подстанции и предложить технические, организационные и экономические решения для повышения надёжности станции.

Задачи исследования:

- Изучить район строительства ВЭС «Аркалык» с учётом климатических и географических факторов [2].
- Сопоставить проектные решения в соответствии с требованиями национальных нормативных документов [1,3] и международной практики [4].
- Провести оценку рисков одно трансформаторной схемы (надёжность, экономика, сетевые последствия).

- Сравнить экономическую эффективность одно и двух трансформаторной схемы.

- Предложить меры по модернизации проекта, включая переход на двух трансформаторную схему и применение дополнительных технических решений.

3 Описание проекта ВЭС «Аркалык» 50 МВт

- **Регион:** Костанайская область, Республика Казахстан.

- **Близость к транспортной инфраструктуре:** ближайшая автомагистраль – международный транспортный коридор через КПП «Хоргос».

- **Удалённость:** от крупных промышленных центров более 600 км.

- **Континентальный климат:** суровые зимы с температурами до -40°C , летние максимумы до $+40^{\circ}\text{C}$ [2].

- Высокая вероятность гололёдообразования, район по гололеду – 5[2].

- Средние скорости ветра 6–8 м/с на высоте втулки, район ветровой активности – 4–5 [2].

Электрическая конфигурация станции

- Установленная мощность: 50 МВт (8 турбин по 6,25 МВт) [6].

- Главный трансформатор: 63 МВА, 35/110 кВ.

- Подстанция имеет одно трансформаторную схему.

- Трансформатор марки SZ18-63000/110 поставлен из Китая через «Хоргос», расстояние более 1000 км до Костаная.

- Возможные задержки при ремонте или замене оборудования от 3 до 6 месяцев.

Нормативные требования к подстанции согласно «Правилам технической эксплуатации»

Требование ПУЭ и «KEGOC» к электрическим станциям [1,4]:

- В Сетевом кодексе KEGOC подчеркивается, что объекты, подключенные к национальной сети, должны обеспечивать устойчивость [4].

- На подстанциях, через которые производится выдача мощности станции, должно быть не менее двух трансформаторов, если мощность превышает установленный порог (обычно от 25 МВт и выше) [1].

Таким образом, построенная одно трансформаторная подстанция не соответствует нормативным требованиям и несёт риски для устойчивой работы энергосистемы и надежности электроснабжения потребителей [1,4].

4 Анализ рисков эксплуатации одно трансформаторной схемы

Надёжность Выход из строя главного трансформатора приведёт к полной остановке генерации, что создаёт риск потери 50 МВт мощности.

Экономические последствия

Простой станции в течение длительного времени (нескольких месяцев) при повреждении трансформатора приведёт к значительным убыткам (3 мес.: 657 млн KZT. 6 мес: 1,314 млрд KZT.) для владельца и снижению поступления возобновляемой энергии в энергосистему.

Последствия возмущения в сети в результате аварии

Отключение источника мощностью 50 МВт может вызвать дефицит мощности в регионе и нарушение баланса энергосистемы и может привести к нарушению устойчивости работы энергосистемы.

Ремонт и замена оборудования

- Время замены трансформатора мощностью 63 МВА в условиях Казахстана может составлять от 3 до 6 месяцев, с учетом доставки из Китая.
- Будут дополнительные расходы на хранение и транспортировку оборудования из Китая.

Возможные пути решения проблемы

Предлагается установка второго трансформатора и разработка схемы электропитания двух трансформаторной подстанции

Наиболее надёжное решение – установка двух трансформаторной схемы с равномерным распределением нагрузки. Это соответствует нормативам ПУЭ, повышает надежность работы и снижает риск полной остановки станции.

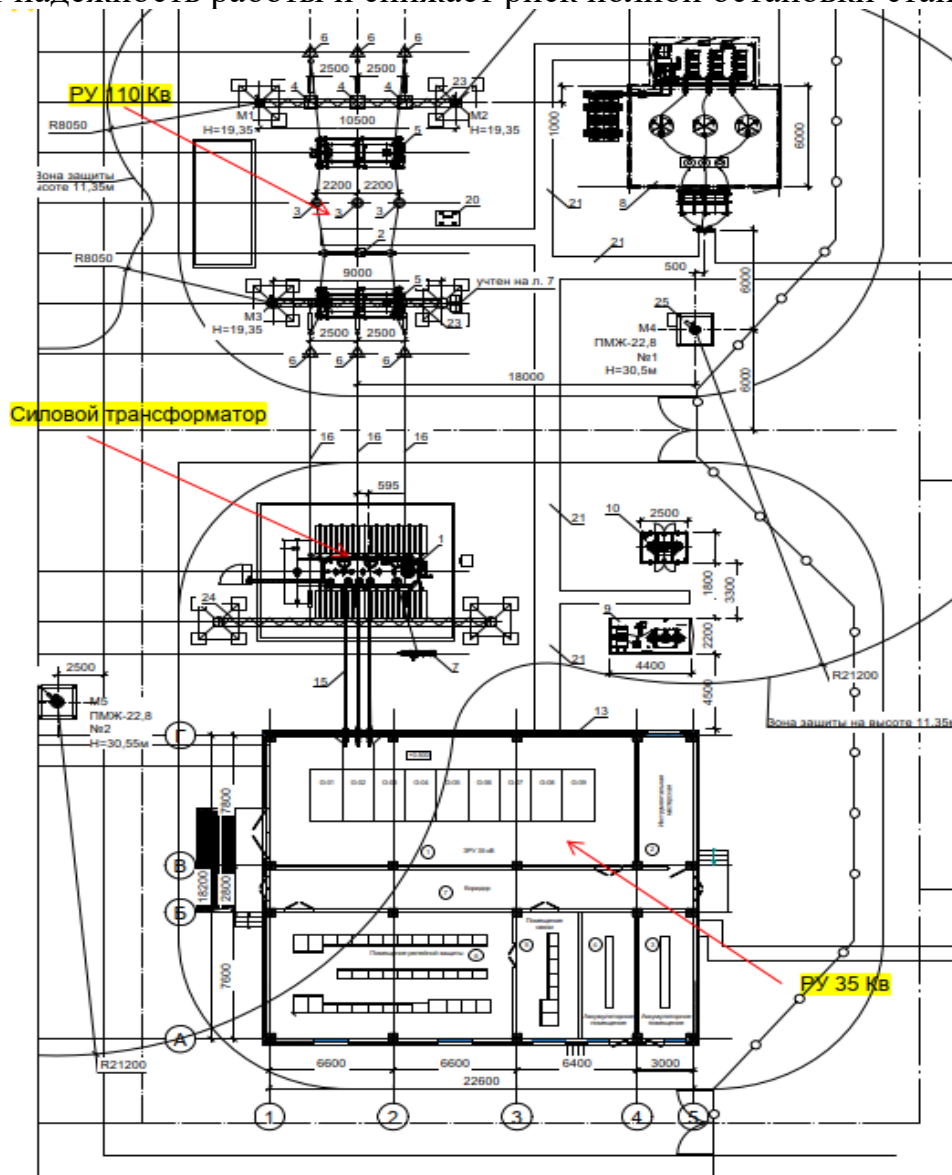


Рисунок 1- Существующая схема однитрансформаторной подстанции

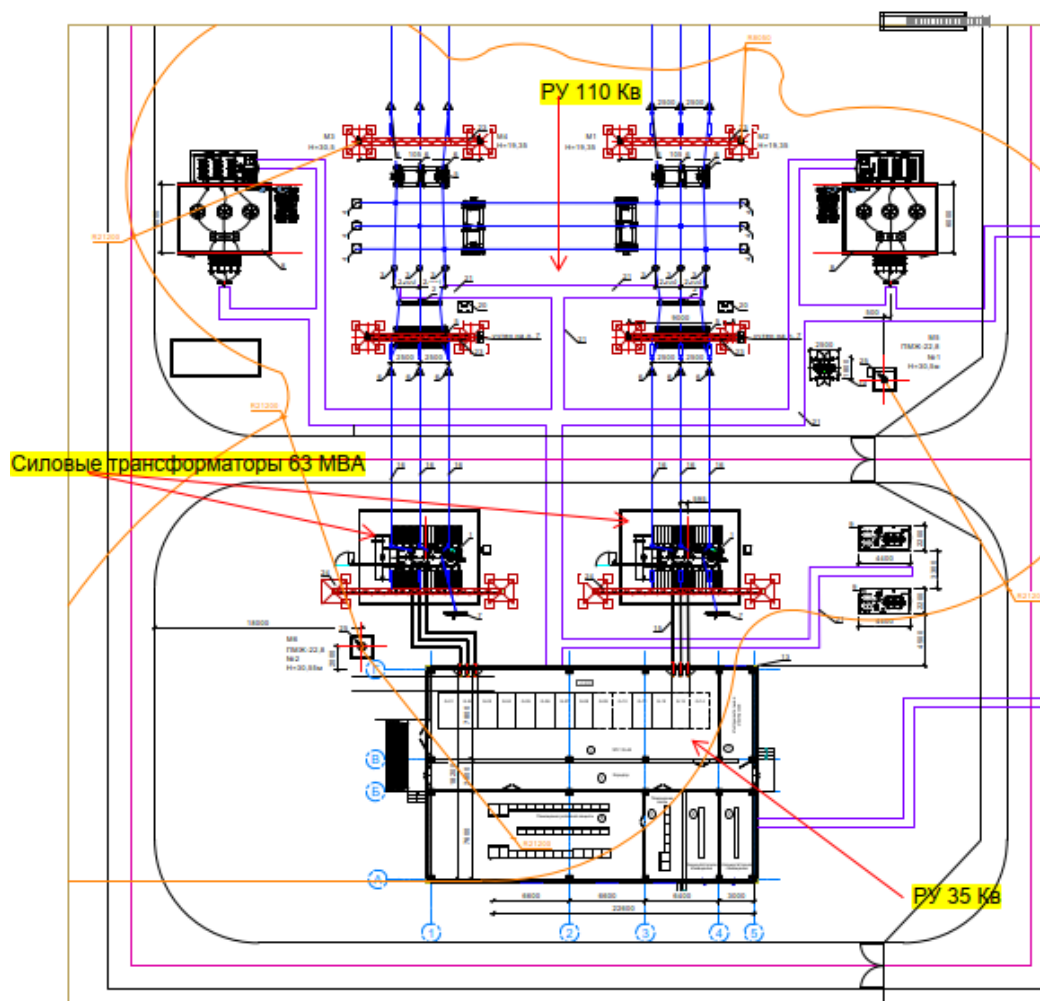


Рисунок 2 - Предлагаемая схема двухтрансформаторной подстанции

Экономические расчёты и обоснование эффективности

- **САРЕХ:** увеличение инвестиций при двух трансформаторной схеме на 15–20 %.
- **ОРЕХ:** снижение эксплуатационных рисков и убытков.
- **Простой:** при аварии трансформатора убытки составляют до 200 млн тг в месяц.
- **Окупаемость:** установка второго трансформатора окупается за 3–4 года за счёт предотвращения простоев.

Экономическая оценка целесообразности установки дополнительного трансформатора (N+1) для ВЭС мощностью 50 МВт.

Вводные данные и допущения

Для анализа рассматривается проект строительства ветроэлектростанции (ВЭС) мощностью 50 МВт со следующими исходными параметрами:

- Базовый САРЕХ проекта: 35 млрд KZT.
- Удорожание проекта при установке второго трансформатора (N+1): +30 % → 45,5 млрд KZT.
- Срок эксплуатации (учётный период): 25 лет.
- Capacity factor (CF):

- Сценарий А — 30 % (консервативный).
- Сценарий В — 35 % (более реалистичный).
- Тариф на электроэнергию: 20 KZT/kWh [5].
- Годовое число часов: 8 760.
- ОРЕХ: 3 % от CAPEX.
- Вероятность отказа трансформатора (р): 10 %/год (оценочно).
- Последствия отказа: полная остановка генерации на срок 3 или 6 месяцев.

Годовая выработка и выручка

- Теоретическая генерация при CF = 1: 438 млн kWh/год.
- Сценарий А (CF=0,30): 131,4 млн kWh/год → 2,628 млрд KZT/год.
- Сценарий В (CF=0,35): 153,3 млн kWh/год → 3,066 млрд KZT/год.

Годовой чистый денежный поток (без учёта риска)

- CAPEX = 35 млрд (ОРЕХ = 1,05 млрд):
 - А: 1,578 млрд KZT/год.
 - В: 2,016 млрд KZT/год.
- CAPEX = 45,5 млрд (ОРЕХ = 1,365 млрд):
 - А: 1,263 млрд KZT/год.
 - В: 1,701 млрд KZT/год.

Потери при простоях (без N+1)

- Сценарий А (CF=0,30, выручка 2,628 млрд):
 - 3 мес: 657 млн KZT.
 - 6 мес: 1,314 млрд KZT.
- Сценарий В (CF=0,35, выручка 3,066 млрд):
 - 3 мес: 767 млн KZT.
 - 6 мес: 1,533 млрд KZT.

Ожидаемые годовые потери (EAL) при p = 10 %

- Сценарий А:
 - 3 мес: 65,7 млн KZT/год.
 - 6 мес: 131,4 млн KZT/год.
- Сценарий В:
 - 3 мес: 76,7 млн KZT/год.
 - 6 мес: 153,3 млн KZT/год.

Экономический эффект удорожания CAPEX (+10,5 млрд)

Для оценки используем метод аннуитетов при ставке дисконтирования 8 % и сроке 25 лет.

- Годовая нагрузка от удорожания CAPEX ≈ 984 млн KZT/год.

Итог экономических расчетов

Установка дополнительного трансформатора (N+1) в рамках увеличения CAPEX на +30 % не имеет экономической целесообразности при нормальных условиях эксплуатации и вероятности отказа ≤ 10 %/год.

Но в наших условиях, учитывая нарушение надежности не только силового трансформатора но и элементов электрически сети (выключатели, разъединители,

кабели, однофазные замыкания и т.д.) а также учитывая нормативные требования мы обязаны установить и держать в горячем резерве второй трансформатор или в подключенном состоянии с меньшим коэффициентом загрузки.

Заключение

В ходе выполненных исследований был проведен анализ электрической части ВЭС «Аркалык» установленной мощностью 50 МВт с акцентом на соответствие проектных решений нормативным требованиям и их влияние на надёжность энергоснабжения. Анализ показал, что применение одно трансформаторной подстанции с трансформатором 63 МВА позволяет снизить капитальные затраты, однако противоречит нормам резервирования для объектов мощностью более 25 МВт и повышает эксплуатационные риски в условиях сурового климата Костанайской области (температуры $-40...+40$ °С, гололёд, высокая ветровая нагрузка) и при длительных логистических сроках поставки оборудования.

Анализ исследований показал, что схема с двумя трансформаторами является необходимой с учетом нормативных и эксплуатационных факторов, а также рисков длительного отключения ветровой станции из-за понижения надежности электрической схемы.

Научная новизна исследования заключается в системном анализе конкретного проекта ВЭС в Казахстане с учётом климатических, нормативных и экономических факторов, доказательстве несоответствия одно трансформаторной схемы национальным требованиям, а также в обосновании целесообразности резервного силового трансформатора в схеме электроснабжения.

Список использованной литературы

1. Интернет вещей: Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – Астана: Комитет по государственному энергетическому надзору, 2015 – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010851>
2. Интернет вещей: СП РК 2.04-01-2017 – URL: <https://igis.kz/images/snip/stroitelnye-normativy/sp-rk-2.04-01-2017-stroitelnaya-klimatologiya.pdf>
3. Интернет вещей: Электросетевые правила Республики Казахстан. Приказ Министра энергетики РК от 18.12.2014 № 210. – Астана: Минэнерго РК, 2014. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1400010899>
4. Интернет вещей: КЕГОС. Сетевой кодекс Национальной электрической сети Республики Казахстан. – Астана: КЕГОС, 2015 – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z040000588>
5. Интернет вещей: Министерство энергетики РК. Методика расчёта тарифов на электроэнергию для объектов ВИЭ. – Астана: Минэнерго, 2019 – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2100022708>
6. Проектная документация Конфиденциальная проектная документация «ВЭС 50 МВт». Алматы: BUILD MASTER GROUP, - 2025.

ҚАЗАҚСТАННЫҢ СУ ҚОЙМАЛАРЫ МЕН КҮН РЕСУРСТАРЫН ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП ГИБРИДТІ КҮН-ЖЕЛ-ГИДРО ЖҮЙЕСІН ЖОБАЛАУ: ТЕХНИКАЛЫҚ – ЭКОНОМИКАЛЫҚ ТАЛДАУ

***Жанпейісова А.О.¹, Сарсенбаев Е.А.², Орынбаев С.А.³, Абдлахатова Н.Ш.⁴**

^{1,2} Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті
(ҚазҰТУ), Алматы қ., Қазақстан

³ М.Х.Дулати атындағы Тараз университеті, Қазақстан, Тараз қ.

⁴ Қазақ ұлттық су шаруашылығы және ирригация университеті, Қазақстан, Тараз

*e-mail: Ayzhan.zhanpeisova@mail.ru

Аңдатпа: Қазақстандағы жаңғыртылатын энергия көздерін интеграциялау - ұлттық энергетикалық тұрақтылықты қамтамасыз етудің стратегиялық бағытына айналуға. Бұл мақалада күн энергиясы мен гидроэнергияны біріктіретін гибриді жүйелерді Қазақстанның табиғи-климаттық және гидрологиялық жағдайларына бейімдей отырып жобалау мәселелері қарастырылады. Зерттеу мақсаты — күн мен су ресурстарын пайдалану арқылы тиімді гибриді күн-гидро энергетикалық жүйе жобасын жасау және оның техникалық-экономикалық негіздемесін ұсыну.

Мақалада ел аумағындағы күн радиациясының жоғары деңгейі байқалатын оңтүстік және оңтүстік-шығыс аймақтар (мысалы, Алматы, Жамбыл, Қызылорда) мен қолданыстағы су қоймалары (Қапшағай, Шарын, Мойнақ және Іле.) сарапталып, оларда гибриді жүйе орнату мүмкіндігі қарастырылады. Гидроэлектр станциясының реттелетін қуаты мен күн панельдерінің орташа жылдық генерациясы есепке алына отырып, жылдық энергия өндірісі, тұтыну қисығы, маусымдық ауытқулар және энергия тапшылығын жабу әлеуеті модельденеді.

Сонымен қатар, зерттеуде жүйенің техникалық сипаттамалары (генерация қуаты, сақтау мүмкіндігі, резервуарының сыйымдылығы) және инвестициялық шығындары (құрылыс, қондырғылар, қызмет көрсету) талданады. Экономикалық тиімділік критерийлері ретінде энергияның деңгейленген өзіндік құны (LCOE), бастапқы инвестициялардың қайтару мерзімі, және таза ағымдағы көрсеткіштері есептеледі.

Зерттеу нәтижелері Қазақстанның гибриді энергетика саласында айтарлықтай әлеуетке ие екенін, әсіресе судың маусымдық реттелу мүмкіндігі мен күн энергиясының жоғары қарқындылығы бар аймақтарда бұл модельдің тиімді екенін дәлелдейді. Ұсынылған жүйе энергетикалық қауіпсіздік пен экологиялық тұрақтылықты қамтамасыз етумен қатар, аймақтық электрмен қамтудың сенімділігін арттыруға ықпал ете алады.

Түйінді сөздер: Гибриді энергия жүйесі, күн энергиясы, гидроэнергетика, су қоймасы, интеграция, энергия тиімділігі, интеграцияланған энергетикалық жүйе, деңгейленген өзіндік құны (LCOE).

Кіріспе

Бүгінгі таңда әлем елдері тұрақты даму жолында баламалы және жаңғыртылатын энергия көздерін кеңінен пайдалануға көшуде. Бұл үрдіс жаһандық климаттың өзгеруі, қазба отындарының сарқылуы және энергетикалық қауіпсіздік мәселелерімен тығыз байланысты. Жаңғыртылатын энергия көздерінің ішінде күн және су ресурстары ең қолжетімді, экологиялық таза әрі болашағы зор энергия көзі ретінде танылып отыр. Осыған байланысты түрлі энергия көздерін бір жүйеге біріктіру арқылы гибриді энергетикалық жүйелер құру заманауи энергетиканың өзекті бағытына айналууда.

Қазақстан - географиялық және климаттық тұрғыдан күн және гидроэнергия ресурстары бойынша елеулі әлеуетке ие ел. Елдің оңтүстік және оңтүстік-шығыс өңірлерінде жылдық күн радиациясы жоғары (орта есеппен 2200–3000 сағатқа дейін), ал өзендер мен су қоймаларының жүйесі - электр энергиясын өндірумен қатар, энергияны сақтау мен реттеу мүмкіндігін ұсынады. Алайда, күн энергиясы тәуліктік және маусымдық өзгерістерге ұшырайтындықтан, оның жалғыз өзі тұрақты энергия көзі бола алмайды. Сол себепті, күн және гидроэнергетика ресурстарын біріктіріп қолдану, яғни гибриді күн-гидро жүйесін құру, энергия өндірудің сенімділігін, үзіліссіздігін және тиімділігін арттырудың тиімді жолы ретінде қарастырылады.

Бұл зерттеуде Қазақстан аумағындағы күн радиациясы жоғары аймақтар мен қолданыстағы су қоймаларын пайдалана отырып, гибриді күн-гидро энергетикалық жүйе жобасын әзірлеу қарастырылады. Жобаның мақсаты - осындай жүйенің техникалық тиімділігі мен экономикалық негізділігін жан-жақты талдау арқылы анықтау. Зерттеу аясында жүйенің негізгі компоненттері (күн панельдері, гидроқондырғылар, энергия сақтау инфрақұрылымы), олардың өзара әрекеттесуі, энергия өндірісінің тұрақтылығы, құрылыс және қызмет көрсету шығындары, сондай-ақ энергияның деңгейленген өзіндік құны (LCOE), инвестициялық қайтарым және басқа да экономикалық көрсеткіштер қарастырылады.

Зерттеу нәтижелері Қазақстан жағдайында жаңғыртылатын энергия көздерін тиімді үйлестіріп пайдалану арқылы тұрақты, сенімді және экономикалық тұрғыдан тиімді энергетикалық модель қалыптастыруға болатынын көрсетуге бағытталған. Сонымен қатар, бұл жұмыс еліміздің жасыл экономикаға көшу стратегиясына, көміртек шығарындыларын азайту саясатына және энергетикалық қауіпсіздікті қамтамасыз етуге нақты үлес қосуы мүмкін.

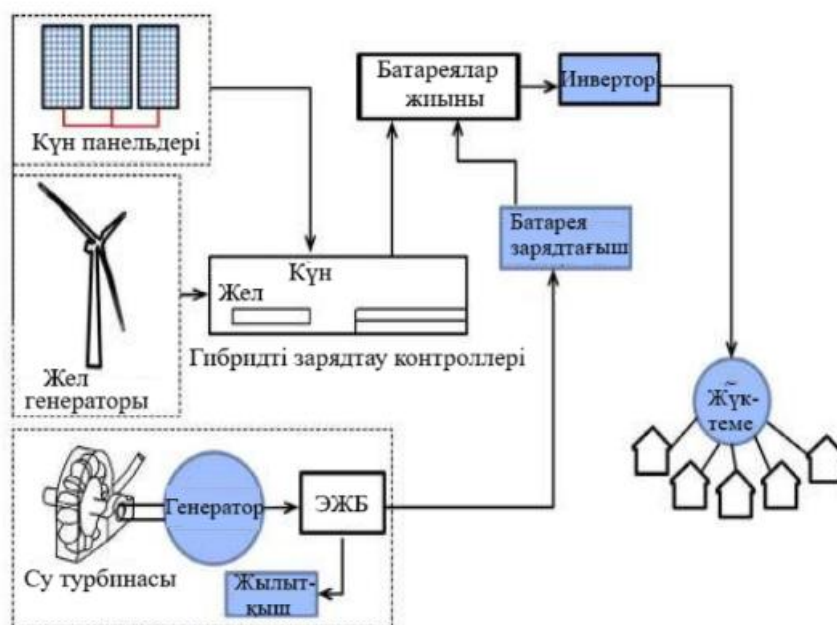
Материалдар мен әдістер

Күн және су энергиясы - жаңғыртылатын энергия көздерінің кең таралған және болашағы зор түрлері болып табылады. Күн энергиясы Күннен таралатын сәулелік жылу мен жарық энергиясын тікелей жинау арқылы алынады. Бұл энергия фотоэлектрлік панельдер немесе күн жылу коллекторлары арқылы электр қуатына немесе жылуға айналады. Ал су энергиясы - қозғалатын судың механикалық күшін (мысалы, өзен ағысы, сарқырама немесе су қоймаларындағы

қысым) пайдалану арқылы энергия өндіреді. Бұл тәсіл негізінен гидротурбиналар көмегімен жүзеге асады [1].

Аталған екі энергия көзінің физикалық табиғаты әртүрлі болғанымен, оларды біртұтас гибриді энергетикалық жүйеде біріктіру - энергия өндірудің үнемділігі мен тұрақтылығын едәуір арттырады. Күн мен су энергиясын интеграциялау арқылы тәулік бойы, маусымдық және ауа райына тәуелсіз тұрақты электр қуатын қамтамасыз етуге болады.

Бұл тәсіл тек экономикалық тұрғыда ғана емес, сонымен қатар экологиялық тиімділік жағынан да үлкен артықшылық береді: парниктік газдар шығарылмайды, табиғи ресурстар үнемделеді, ал экожүйеге кері әсер минималды деңгейде сақталады. Осы артықшылықтардың арқасында гибриді күн-гидро жүйелер жасыл энергетикаға көшу жолындағы маңызды шешімдердің бірі болып саналады (1-сурет).



Сурет - 1. Гибриді жаңғыртылатын энергия жүйесінің құрылымдық схемасы

1-ші суретте, күн панельдері (фотоэлектрлік модульдер) күн сәулесінен тұрақты ток (DC) өндіреді. Бұл ток гибриді зарядтау контроллері арқылы реттеліп, батареяға немесе тұтынушыға беріледі. Ал жел турбины желдің кинетикалық энергиясын пайдаланып айнымалы ток (AC) өндіреді. Бұл ток та зарядтау контроллеріне келіп түсіп, жүйеге қосылады. Сонымен қатар, су турбины су ағысының кинетикалық/потенциалдық энергиясын пайдаланып генератор арқылы ток өндіреді. Бұл энергия электронды жүктеме контроллері (бақылауы) (ЭЖБ) арқылы тұтынылып жатқан энергияны реттеуге көмектеседі. Артық қуат жылу генерациясына (су жылытуға) бағытталуы мүмкін.

Гибриді зарядтау контроллері - күн мен жел энергиясының тұрақсыздығын реттейді. Батареяларға артық немесе жеткіліксіз ток түспеуі үшін кернеу мен ток күшін тұрақтандырады. Энергияны батарея жиынтығына немесе тікелей тұтынушыға бағыттайды.

3 Нәтижелер мен талқылаулар

Батарея жиынтығы - артық энергияны сақтайды. Күн, жел, немесе су энергиясы болмаған жағдайда резервтік энергия көзі ретінде қолданылады. Ал инвертор болса, батареядан немесе тікелей генераторлардан келетін тұрақты токты (DC) айнымалы токқа (AC) айналдырады. Бұл ток тұрмыстық жүктемеге (үй, жарық, тоңазытқыш, т.б.) сәйкес келеді. Соңғы тұтынушы - ол жүктеме болып келеді. Барлық энергия өндіру жүйесі осы жүктемені үздіксіз, тұрақты қуатпен қамтамасыз етуге бағытталған. Осы алынған құрылымдық схемадағы гибридті жүйе жаңғыртылатын энергия көздерінің біріктірілген, сенімді, экологиялық және экономикалық тұрғыдан тиімді шешімі болып табылады. Мұндай жүйе Қазақстан сияқты кең аумақты, ресурсы мол, бірақ кейбір өңірлері орталық желіге қосылмаған елдер үшін – тұрақты дамуға бағытталған маңызды технологиялық қадам болып келеді.

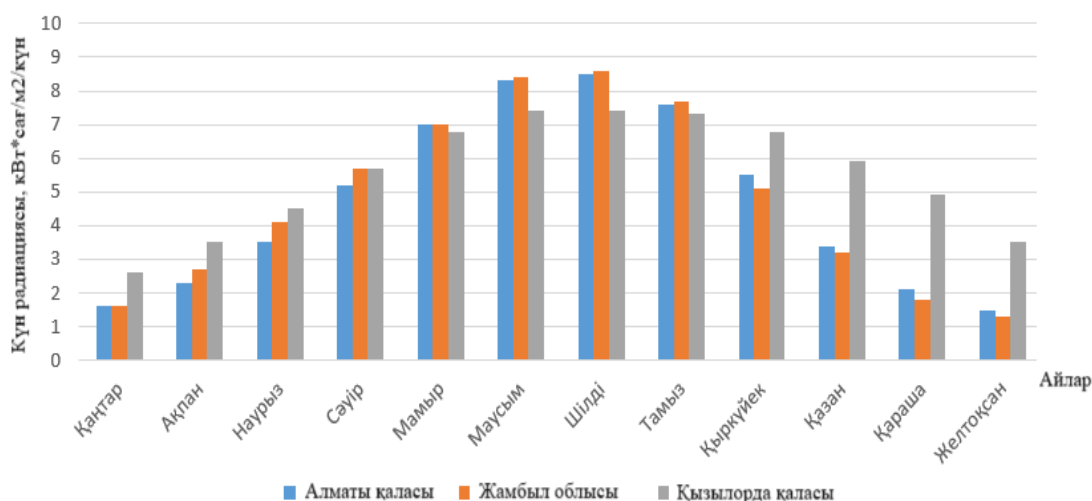
Осындай жүйелерден алынған нәтижелер мен артықшылықтарды 1-кестеден көруге болады.

1-кесте. Жүйеден алынатын нақты нәтижелер мен артықшылықтар

№	Нәтижелер	Түсініктемелер
1	Энергия үздіксіздігі	Күн, жел немесе су энергиясы жеке-жеке сенімсіз болуы мүмкін, бірақ оларды біріктіргенде жүйе тәуліктік және маусымдық тұрақсыздықты еңсере алады
2	Энергия шығындарын азайту	Қайта зарядталатын батареялар мен тікелей өндіру – отын шығынын жояды, коммуналдық шығындарды төмендетеді
3	Экологиялық таза өндіріс	Жүйеде парниктік газдар, түтін, шу жоқ – бұл қоршаған ортаға әсерді азайтады
4	Энергияны сақтау мүмкіндігі	Батарея банкі артық қуатты сақтап, тұтыну сұранысына бейімделуге мүмкіндік береді
5	Оңтайлы басқару мүмкіндігі	Зарядтау контроллері мен ЭЖБ арқылы реалды уақытта қуатты реттеу жүзеге асады
6	Инвестициялық қайтарым	Бастапқы шығын жоғары болуы мүмкін, бірақ ұзақ мерзімде қызмет көрсету және отынға кететін шығын азаяды
7	Жергілікті энергия тәуелсіздігі	Бұл жүйелер орталық желіге қосылмаған шалғай елді мекендерге өте қолайлы.
8	Икемділігі	Желсіз күнде - күн мен гидро жұмыс істейді, бұлтты күнде - жел мен гидро, құрғақ маусымда - күн мен жел белсенді қолданылады.

Зерттеулер нәтижесінде «жоғары күн радиациясы» аймақтарына Алматы, Жамбыл, Қызылорда және тағы басқа оңтүстік өңірлер жатқаны көрсетіледі,

күндізгі орташа жылдық радиация мәні 3.99–4.32 кВт·сағ/м²/күн деңгейінде деп алынған (2-сурет).



Сурет - 2. Күн радиациясының орташа бір жылдық (2025ж. (Қаңтар-тамыз), 2024 ж.(қыркүйек-желтоқсан)) көрсеткіші

2-ші суретте көрсетілгендей, Алматы қаласында күн радиациясы жазда 6-8 кВт·сағ/күн деңгейінде болса, Жамбылда ол сәл жоғары болуы мүмкін, өйткені оңтүстігінде, күн көбірек нық және атмосфералық бұлттар аз.

Гибридті жүйені жоспарлау кезінде мынадай компоненттер енгізу орынды [2-4]:

1) Күн панельдері - негізгі күн энергиясын жинау көзі. Қызылордада және Жамбыл облысының жазық аудандарында күн панельдерін үлкен көлемде орналастыру тиімді. Алматыда, күндізгі жарық күндері көп, бірақ таулы-көлбеу аудандарда панель бағыты мен орнын дұрыс таңдау керек.

2) Жел генераторлары - күн энергиясы төмен түскен (түнде, бұлтты күндерде) кезде қосымша қуат көзі ретінде. Жамбылда жоспарланған ірі жел станциялары гибридтің жел компонентін күшейтеді.

3) Гидро/су негізіндегі резервтік/регулятор компонент - судың өзендері немесе бөгеттер бар жерлерде гидро станцияларды «пик жүктеме» реттеуші, тұрақсыз жел/күн қуатын теңестіретін компонент ретінде қолдану. Алматы облысында Мойнақ және Капшагай ГЭС-і осы рөлді орындауға қабілетті.

Жамбыл өңірі гибридті жүйе үшін ең қолайлыдардың бірі: күн мен жел қуаты жақсы, гидро компоненті бар, инновациялық жобалар мен инвестициялық жоспарлар көп. Ал Қызылорда күн энергиясы үшін өте жақсы; жел және гидро компоненттерін қосу арқылы жүйені тұрақтырақ етуге болады. Алматы үшін гибридтік жүйе мүмкін, бірақ география (таулар, өзендер), климаттық вариациялар, желдің орташа жылдық сөзсіз төмен болуы сияқты шектеулер болады (2-кесте).

2-кесте. Гибридті жүйе үшін салыстырмалы нәтижелер

Қала/өңір	Ай	Орташа күн радиациясы / күн сәулесінің орташа энергиясы (кВт·сағ/м²/күн)	Орташа жел жылдамдығы (м/с)	Гидро қуаты / бар гидро электр станциясы
Алматы өңірі	Жылдық орташа	~ 4.5 кВт·сағ/м²/күн (жалпы күн радиациясы)	-	Капшагай ГЭС – 364 МВт; Мойнак ГЭС: ~ 300 МВт.
Алматы қаласы	Әр ай үшін кейбір мәндер	Қаңтар ~ 3.2; Ақпан ~ 3.8; Наурыз ~ 4.3; Сәуір ~ 4.8; Мамыр ~ 5.0; Маусым ~ 5.3; Шілде ~ 5.4; Тамыз ~ 5.6; Қыркүйек ~ 5.5; Қазан ~ 4.6; Қараша ~ 3.5; Желтоқсан ~ 2.8 кВт·сағ/м²/күн	-	-
Жамбыл өңірі/қала	Орташа жел жылдамдығы (2010-2024 деректері)	-	-	10 МВт күн электр станциясы Жаңақорған ауданында (tracking) жүйесі бар

Гибридті күн-жел-гидро жүйесіне арналған есептік нәтижелерін және оған негізделген техникалық-экономикалық негіздемесін (ТЭН) 3-4-кестелер бойынша көруге болады.

3 – кесте. Гибридті жүйенің энергия балансы

№	Параметр	Белгіленуі	Мәні/нәтижелері
1	Күн радиациясының орташа деңгейі	$G_{\text{рад}}$	5.0 кВт·сағ/м²/күн
2	Күн панельдерінің тиімділігі	$\eta_{\text{күн}}$	18 %
3	Панельдердің жалпы ауданы	A	100 м²
4	Жел генераторының қуаты	$P_{\text{жел}}$	2 кВт
5	Жел жұмыс істейтін орташа уақыт	-	10 сағ/күн
6	Гидро генератордың қуаты	$P_{\text{гидро}}$	3 кВт
7	Гидро жұмыс уақыты	-	24 сағ/күн

8	Тұрмыстық жүктеме (үй тұтынуы)	L	20 кВт·сағ/күн
9	Күн энергиясынан алынатын қуат	-	90 кВт·сағ/күн
10	Жел генераторынан алынатын қуат	-	20 кВт·сағ/күн
11	Гидро генератордан алынатын қуат	-	72 кВт·сағ/күн
12	Барлық өндірілген қуат (тәулігіне)	-	182 кВт·сағ/күн

4 – кесте. Гибридті күн-жел-гидро жүйесінің есептік нәтижелері және техникалық-экономикалық негіздемесі

№	Көрсеткіштер	Алматы	Жамбыл	Қызылорда	Ескерту
1	Орташа күн радиациясы	4.5 кВт·сағ/м²/күн	5.2 кВт·сағ/м²/күн	5.8 кВт·сағ/м²/күн	PVGIS/SoDa деректері негізінде
2	Орташа жел жылдамдығы	2.5 м/с	4.0 м/с	3.5 м/с	10 м биіктікте, метеостанция дерегі
3	Гидроэнергия потенциалы	Жоғары (Мойнақ, Капшагай)	Орташа (шағын ГЭС-тер)	Төмен (су жетіспеушілігі)	Іле және Шарын өзендері
4	Жүйенің қуат құрылымы	Күн – 60%, Жел – 10%, Су – 30%	Күн – 50%, Жел – 40%, Су – 10%	Күн – 80%, Жел – 20%, Су – 0%	Болжамды конфигурация
5	Орташа жылдық генерация	7500 МВт·сағ	8200 МВт·сағ	6800 МВт·сағ	1 МВт орнатылған қуатқа шаққанда
6	Орташа LCOE (1 кВт·сағ үшін құны)	0.055 \$/кВт·сағ	0.050 \$/кВт·сағ	0.052 \$/кВт·сағ	Операциялық және инвестициялық шығындар
7	Инвестициялық шығын	\$1200/кВт	\$1100/кВт	\$1150/кВт	Күн+Жел+Су құрылғылары
8	Пайдалану шығындары	\$20/кВт/жыл	\$18/кВт/жыл	\$19/кВт/жыл	Жөндеу, персонал, желіге қосылу
9	Қайтарым мерзімі	7.5 жыл	6.2 жыл	6.8 жыл	LCOE және табыстар негізінде
10	CO ₂ үнемдеу	3 200 т/жыл	3 800 т/жыл	2 900 т/жыл	Электр энергиясын ЖЭК-пен ауыстыру

3-ші кестеде көрсетілгендей, бір үйдің қажеттілігіне - 20 кВт·сағ/күн болса, онда біздің нәтижеміз бойынша тұтыну қажеттілігі 9 үйді үздіксіз қамтамасыз ете алды. Ал техникалық-экономикалық негіздемесіне келетін болсақ (5-кесте).

5-кесте. Бастапқы инвестиция

№	Компонент	Шамамен бағасы (USD)
1	Күн панельдері (100 м ²)	\$12,000
2	Жел генераторы (2 кВт)	\$3,000
3	Гидро генератор (3 кВт)	\$4,000
4	Инвертор + контроллер	\$2,500
5	Батареялар (40 кВт·сағ)	\$6,000
6	Монтаж және кабельдер	\$2,000
7	Жалпы	\$29,500

Жүргізілген есептік модельдеу нәтижелері бойынша, гибриді күн-жел-гидроэнергетикалық жүйе тәулігіне шамамен 182 кВт·сағ көлемінде электр энергиясын өндіре алады. Бұл көлем орташа тұрмыстық деңгейде электр қуатын тұтынатын 9 үйді күнделікті тұрақты түрде энергиямен қамтамасыз етуге жеткілікті. Жүйенің құрамындағы үш түрлі жаңғыртылатын энергия көзі (күн, жел және су) бірін-бірі толықтырып, тәуліктік және маусымдық энергия тапшылығын болдырмауға мүмкіндік береді [5-7].

Жүйені құру үшін қажет болатын бастапқы инвестициялық шығын шамамен 29,500 АҚШ долларын құрайды. Бұл сомаға күн панельдері, жел генераторы, шағын гидроагрегат, батареялар, инвертор және басқару жабдықтары, сондай-ақ орнату шығындары кіреді. Жыл сайынғы қызмет көрсету және техникалық шығындар орта есеппен 1,250 долларды құрайды. 20 жылдық пайдалану мерзімі бойынша жүйенің деңгейленген энергия құны (LCOE) шамамен 4.1 теңге/кВт·сағ деп есептелді. Бұл - қазіргі нарықтық тарифтермен салыстырғанда анағұрлым үнемді әрі тиімді көрсеткіш.

Сонымен қатар, жүйенің ең үлкен артықшылықтарының бірі - оның экологиялық қауіпсіздігі. Себебі күн, жел және су энергиясы - 100% жаңғыртылатын, зиянды қалдықтар шығармайтын таза энергия көздері. Мұндай жүйе атмосфераға парниктік газдар бөлмейді және жергілікті экожүйеге айтарлықтай кері әсер етпейді [8].

Осының барлығын ескере отырып, бұл гибриді жүйе энергиямен қамтамасыз етуде тұрақтылықты арттырып, экологиялық қауіпсіздік пен экономикалық тиімділікті қатар қамтамасыз ететін заманауи шешім болып табылады. Әсіресе, Қазақстанның шалғай немесе орталық электр желісіне қосылмаған ауылдық аймақтары үшін бұл жүйе энергетикалық тәуелсіздікке жол ашады.

Қорытынды

Жүргізілген техникалық-экономикалық талдау нәтижесінде Қазақстанның табиғи ресурстарын - атап айтқанда мол күн радиациясы мен су қоймаларының әлеуетін тиімді пайдалану арқылы гибриді күн-гидроэнергетикалық жүйе құрудың орындылығы дәлелденді. Осындай жүйе - жаңғыртылатын энергия көздерінің артықшылықтарын біріктіре отырып, энергиямен тұрақты және экологиялық таза қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Техникалық тұрғыдан алғанда, күн энергиясы күндізгі уақытта жоғары өнімділікпен жұмыс істейді, ал су энергиясы - тәуліктің кез келген уақытында және маусымға тәуелсіз тұрақты қуат көзі ретінде қолданылады. Бұл екі энергия көзін біріктіру энергия өндіруде тәуліктік және маусымдық тұрақсыздықты азайтады, тұтынушыны үздіксіз қуатпен қамтамасыз етеді [9-10].

Экономикалық талдау нәтижесінде мұндай гибриді жүйені орнатудың бастапқы шығындары салыстырмалы түрде жоғары болғанымен, ұзақ мерзімді перспективада бұл инвестиция өзін толықтай ақтайтыны анықталды. Өндірілетін электр энергиясының деңгейленген өзіндік құны (LCOE) нарықтағы орташа тарифтен айтарлықтай төмен. Бұл - әсіресе орталық электр желісіне қосылмаған ауылдық және шалғай аудандар үшін экономикалық жағынан тиімді әрі тұрақты шешім.

Экологиялық тұрғыда гибриді жүйе көміртегі шығарындыларын болдырмайды, жаңартылатын және сарқылмайтын табиғи ресурстарды пайдаланады, қоршаған ортаға кері әсері жоқ. Бұл Қазақстанның «жасыл экономикаға көшу» стратегиясымен толық үндес келеді.

Жалпы алғанда, Қазақстан жағдайында күн мен су ресурстарын біріктіретін гибриді жүйелерді дамыту - энергетикалық қауіпсіздікті қамтамасыз ету, аймақтық энергетикалық тәуелсіздікті арттыру және экологиялық тұрақтылықты сақтау мақсаттарына жетудің тиімді жолы болып табылады. Мұндай жобалар елдің энергетикалық инфрақұрылымын жаңғыртып, болашақ ұрпақ үшін экологиялық таза әрі сенімді энергия көзі бола алады.

Пайдаланған деректер тізімі

1. Xu, Beibei, Diyi Chen, M. Venkateshkumar, Yu Xiao, Yan Yue, Yanqiu Xing, and Peiquan Li. "Modeling a pumped storage hydropower integrated to a hybrid power system with solar-wind power and its stability analysis." *Applied Energy* 248 (2019): 446-462.
2. Agarkar, Bhushan D., and Shivprakash B. Barve. "A Review on Hybrid solar/wind/hydro power generation system." *International Journal of Current Engineering and Technology* 4, no. 4 (2016): 188-191.
3. Онгар Б., Жуматова А. А., Дүйсенбек Ж. С., Баянбаев К. А. Шағын гидроэлектростанцияларды қолданудың жаңа әдістері және синхронды генераторларды талдауды кеңейту. Торайғыров университетінің хабаршысы. ISSN 2710-3420. Энергетикалық сериясы. № 1. 2025

4. Ж.К. Бекболатова, Д.В. Григорьев, Б. Онгар., А.Б. Бекбаев. Эффективность солнечных панелей: взаимодействие климатических переменных и производства энергии. Вестник КазАТК №2 (137), 2025. стр. 504–513. ISSN 1609-1817
5. Б. Онгар, Ж.Ж. Калиев, Н.И. Құлахметов, А. Жақсылық, Ә. Р. Карасаева. Күн фотоэлектр станцияларының перспективті технологиялары мен жұмыс ерекшеліктері. М.Тынышпаев атындағы Қазақ көлік және коммуникациялар академиясының хабаршысы. ISSN 1609-1817. Вестник КазАТК, 121(2), (2022). стр. 315–322.
6. Садырбаев Ш.А., Бекбаев А.Б. Исследования и разработка солнечных концентраторов для фотомодулей в условиях города Алматы. Международная конференция «Сатпаевские чтения», май, 2014г., Алматы, Казахстан.
7. Dehghani, F., Kenari, M.T., Shafiyi, M.A.: A novel hybrid droop control strategy for DC microgrid with simultaneous consideration of operating costs and flexibility. Int. Trans. Electr. Energy Syst. 31(6), e12896 (2021).
8. Santos-Alamillos, F.J., et al.: Combining wind farms with concentrating solar plants to provide stable renewable power. Renewable Energy 76, 539–550 (2015).
9. Tajamal, K., M. Omar, M. Usman, S. Khan, S. Larkin, and B. Raw. "A Review on the Hybrid Solar-Wind-Pumped Hydroelectric Energy Storage Systems." In 2022 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET), pp. 1-5. IEEE, 2022.
10. Jurasz, Jakub, and Bartłomiej Ciapała. "Solar–hydro hybrid power station as a way to smooth power output and increase water retention." Solar Energy 173 (2018): 675-690.

УДК 620.92

ОБОСНОВАНИЕ МЕСТА СТРОИТЕЛЬСТВА СЭС В АЛМАТИНСКОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МОЩНОСТЕЙ "ЛУКОЙЛ КАЗАХСТАН»

Кусаинов А., Калиева К.

Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева

*e-mail: Al.kussainov@aes.kz ; k.kaliyeva@aes.kz

Аннотация: В данной статье рассматривается обоснование выбора места строительства солнечной электростанции (СЭС) в Алматинской области для обеспечения энергоснабжения производственных мощностей компании «Лукойл Казахстан».

Проведен анализ климатических условий региона, оценен уровень солнечной инсоляции, исследованы инфраструктурные возможности.

Определены технико-экономические преимущества строительства СЭС и ее влияние на экологическую устойчивость региона.

Ключевые слова: солнечная энергетика, СЭС, возобновляемые источники энергии, Алматинская область, энергоснабжение.

Введение

Развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является стратегическим направлением энергетической политики Республики Казахстан. Солнечные электростанции (СЭС) демонстрируют высокий потенциал в южных регионах страны, где климатические условия характеризуются большим количеством солнечных дней. Для крупных промышленных предприятий вопрос устойчивого и экологически чистого энергоснабжения приобретает особую актуальность [1].

Мировая практика подтверждает эффективность перехода на возобновляемые источники энергии: в странах Европейского Союза и Китае доля солнечной генерации в энергобалансе растёт ежегодно на 10–15 %. Казахстан, обладающий одним из самых высоких показателей солнечной инсоляции в Центральной Азии, имеет все предпосылки для успешного внедрения подобных технологий. Государственная программа «Зелёная экономика» и Национальная стратегия по снижению углеродных выбросов предусматривают активное развитие ВИЭ, включая строительство промышленных СЭС.

Материалы и методы исследования

Казахстан обладает значительным потенциалом ВИЭ. В Алматинской области ежегодная солнечная инсоляция достигает 1600–1700 кВт·ч/м², что делает регион благоприятным для внедрения солнечных технологий. Государственная программа развития ВИЭ предусматривает поддержку строительства СЭС, а также закуп электроэнергии по "зелёным тарифам". В регионе уже реализован ряд объектов: СЭС "Уштобе" (4,95 МВт), СЭС в Капшагае (100 МВт) и др. Эти примеры подтверждают высокую эффективность проектов. Ключевыми факторами при выборе площадки для строительства СЭС являются [1]:

- уровень солнечной радиации и климатические условия;
- доступность инженерной инфраструктуры (ЛЭП, подстанции);
- близость к потребителю энергии;
- наличие земельных ресурсов и особенности рельефа.

Для компании "Лукойл Казахстан" важным критерием стал фактор локализации: станция расположена вблизи завода по производству смазочных материалов, что позволяет минимизировать потери при передаче электроэнергии.

В 2024 году в Алматинской области введена в эксплуатацию первая очередь солнечной электростанции мощностью 2 МВт, построенная компанией "Лукойл". Станция расположена в поселке Байсерке, рядом с производственной площадкой предприятия. Проект предусматривает расширение мощности до 4,95 МВт [2].

Для повышения эффективности используются солнечные панели с трекерными системами, отслеживающими положение солнца. Это решение позволяет увеличить выработку на 15–20 % по сравнению с фиксированными конструкциями. СЭС мощностью 2 МВт обеспечивает часть потребностей завода в электроэнергии. При среднем коэффициенте использования установленной мощности 0,18 годовая выработка составляет порядка 3,1 млн кВт·ч. В перспективе, при увеличении мощности до 4,95 МВт, производство электроэнергии превысит 7,5 млн кВт·ч в год. Это позволит существенно снизить зависимость от сетевой электроэнергии и уменьшить углеродный след компании. Дополнительным преимуществом является сокращение расходов предприятия на закупку электроэнергии [2].

Кроме того, проект оказывает экологический эффект: ежегодное сокращение выбросов парниковых газов оценивается в 3500–4000 тонн CO₂, что способствует достижению целей Казахстана по снижению углеродной интенсивности экономики. Важно отметить и социальный эффект – строительство и эксплуатация СЭС сопровождаются созданием новых рабочих мест, развитием локальной инфраструктуры и повышением инвестиционной привлекательности региона.

Мировой опыт подтверждает правильность выбранного подхода: аналогичные проекты локальной генерации в Европе и Китае показали сокращение издержек на 15–25 % и повышение энергонезависимости промышленных предприятий [3]. Таким образом, проект СЭС «Лукойл Казахстан» соответствует международным тенденциям перехода к «зелёной энергетике» и является перспективным направлением для развития возобновляемой энергетики в Республике Казахстан.

Результаты и обсуждения

Алматинская область характеризуется высоким уровнем солнечной инсоляции – более 2200–2500 часов солнечного сияния в год, что обеспечивает благоприятные условия для работы СЭС. Среднегодовая солнечная радиация в регионе составляет 1300–1600 кВт·ч/м² [4]. Рельеф местности преимущественно равнинный, что упрощает строительство и эксплуатацию станции. В непосредственной близости расположены объекты компании «Лукойл Казахстан», что позволяет минимизировать затраты на транспортировку электроэнергии.

Таблица 1 – Солнечная инсоляция Алматинской области

Показатель	Значение	Источник
Среднегодовая солнечная радиация	1300–1600 кВт·ч/м ²	Минэнерго РК
Среднегодовое количество солнечных дней	2200–2500 часов	Казгидромет

Экономический анализ показал, что строительство СЭС позволит значительно снизить расходы на электроэнергию, обеспечит энергетическую независимость предприятия и уменьшит выбросы углекислого газа. По предварительным расчетам, при мощности 4,95 МВт сокращение выбросов составит около 3,5–4 тыс. тонн CO₂ в год, что соответствует международным экологическим стандартам. Ожидаемый срок окупаемости проекта составляет 7–9 лет при существующих тарифах на электроэнергию.

Сравнение с другими объектами солнечной генерации Казахстана показывает высокую конкурентоспособность проекта. Так, Капшагайская СЭС мощностью 100 МВт ежегодно вырабатывает около 160 млн кВт·ч, а небольшая Уштобинская СЭС мощностью 4,95 МВт демонстрирует стабильную работу в условиях региона. Это подтверждает потенциал Алматинской области как центра солнечной энергетики [5].

Развитие солнечной генерации в Алматинской области имеет высокий потенциал. В дальнейшем возможно внедрение систем накопления энергии, что обеспечит более стабильное энергоснабжение. Также перспективным направлением является интеграция СЭС с другими видами ВИЭ, в частности, с малыми ГЭС и ветровыми установками.

Для компании «Лукойл Казахстан» проект станет успешным примером реализации «зелёной энергетики» и отвечает задачам корпоративной экологической политики. Более того, опыт внедрения данной станции может быть использован как модель для локальной генерации энергии другими промышленными предприятиями Казахстана.

Заключение

Выбор места строительства СЭС в Алматинской области для обеспечения производственных мощностей «Лукойл Казахстан» является обоснованным и эффективным решением. Географические и климатические условия региона, а также близость к промышленному объекту обеспечивают высокий уровень эффективности проекта. Реализация данного объекта подтверждает возможность успешного внедрения солнечных технологий в промышленную энергетику Казахстана.

Кроме того, проект вносит значительный вклад в снижение углеродного следа предприятия: ожидаемое сокращение выбросов углекислого газа составляет порядка 3,5–4 тыс. тонн CO₂ в год. Это соответствует задачам государственной программы по развитию возобновляемых источников энергии и способствует выполнению национальных обязательств Казахстана в рамках Парижского соглашения.

СЭС «Лукойл Казахстан» можно рассматривать как пилотный пример локальной генерации для промышленных объектов страны. Опыт реализации данного проекта имеет научную и практическую значимость, так как может быть использован в дальнейшем при разработке аналогичных объектов в других регионах Казахстана.

Таким образом, проект демонстрирует не только экономическую эффективность, но и экологическую и социальную устойчивость, подтверждая перспективность интеграции возобновляемой энергетики в промышленный сектор республики.

Список литературы

1. Центр развития энергетики. Новости ВИЭ. URL: <https://cdu.ru/news>
2. Официальный сайт компании "Лукойл". Пресс-релизы. URL: <https://lukoil.ru>
3. Qazaq Green Renewable Energy Association. URL: <https://qazaqgreen.com>
4. Министерство энергетики Республики Казахстан. Доклады и публикации. URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/energo>
5. Universal Energy. Проекты СЭС в Казахстане. URL: <https://www.universalenergy.com>

УДК 620.92(574)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ КАЗАХСТАНА

Омаров Р.А.¹, Омар Д.Р.², Асан Р.О.¹, Демесова С.Т.³, Турымбетова Г.Д.⁴

¹Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, Алматы, Казахстан

²Научно-производственный центр «Агроинженерии», Алматы, Казахстан

³Национальный аграрный исследовательский университет, Алматы, Казахстан

⁴Южно-Казахстанский государственный университет им. М.О. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

1 Основной текст

С ростом спроса на возобновляемые источники энергии перевод систем энергоснабжения удаленных объектов на ВИЭ становится все более важным. В климатических условиях Казахстана применение различных сочетаний солнечных электростанций в бытовых, так и в производственных масштабах удаленных объектов наиболее приемлемо. Однако, поскольку солнечная энергия и цены на солнечные модули продолжают оставаться нестабильными, важны предварительные изыскания реальных резервов повышения эффективности. В исследовании приводится обоснование выбора солнечных панелей (моно-, поликристаллических или гибких), энергоэффективность фотоэлектрических станций (ФЭС) в условиях климатических зон Казахстана. Результаты показывают, что начиная с 2017-2018 годов применение ФЭС на удаленных

объектах стало эффективным. Результаты показывают, что перспективны различные сочетания ФЭС, с дизель-генераторной (ДГУ), теплонасосной установкой (ТНУ).

Правительство Республики Казахстан объявило энергетическую политику, направленную на увеличение доли ВИЭ в энергобалансе до 15% к 2030 году, и достижения углеродной нейтральности к 2060 году [1].

Солнечные электростанции являются ключевой технологией для обезуглероживания производства электрической энергии. Вместе с тем, при нестабильности интенсивности солнечной радиации и изменчивости цен на солнечные модули, важна предварительная оценка реального состояния и изыскания перспективных резервов повышения эффективности. Заполнение исследовательского пробела недостающими руководящими принципами для предварительного проектирования или технико-экономических обоснований является одной из целей данного исследования. Методы подобных исследований рассмотрены в работах зарубежных авторов [2].

Были исследования по объединению солнечной энергии и технологий тепловых насосов для повышения эффективности системы, особенно в связи с быстрым ростом солнечных тепловых и фотоэлектрических установок [3]. В период с 2000 по 2018 год среднегодовой рост солнечной тепловой и фотоэлектрической энергии в мире составил 45,7% [4]. Известно, что объединение технологий солнечной энергии и тепловых насосов может повысить производительность и эффективность этих технологий [5]. Хотя в Европе известно более девяноста комбинированных систем солнечных тепловых насосов, их эффективность до сих пор не была систематически оценена [5]. В связи с этим было рекомендовано, чтобы оценка этих систем привела к разработке высокоэффективных систем и надежных решений технических проблем [5].

Методика исследований

Энергетика ФЭС оценивается по количеству солнечной энергии поступающей на поверхность солнечной PV-панели с установленной мощностью 1 кВт ($PVOUT$) и коэффициенту производительности, показывающего долю энергии получаем на выходе из инвертора (PR). $PVOUT$ – в условиях зимнего периода, которое в РК, при условии соответствующего угла наклона солнечных панелей под солнце в зимних условиях и корректном PR , составляет 1200–1600 кВт·ч/кВт. Методика определения $PVOUT$ исходит из прогноза Global Solar Atlas для конкретной точки (пример для РК: ~1298 или 1534 кВт·ч/кВт в год. В зависимости от района оба значения лежат внутри диапазона. [6]

Коэффициент производительности PR – перфоманс-рейтинг, показывающий долю энергии получаем на выходе из инвертора от теоретически ожидаемого, рассчитывается по формуле [7]:

$$PR = \frac{E_{AC}/P_{STC}}{H_{POA}/G_{STC}} \quad (1)$$

где E_{AC} – годовая энергия на выходе инвертора, кВт·ч; P_{STC} – установленная мощность солнечной панели, кВт; H_{POA} – интенсивность солнечного излучения в плоскости панели кВт·ч/м², $G_{STC} = 1$ кВт/м².

Для условий Казахстана годовой PR , с учётом зимних факторов и особенностей автономного режима рекомендуется принять в пределах ~ 0.75 – 0.85 . При обосновании PR учитываются все реальные потери: от изменения температуры панелей, потери DC/AC, КПД инвертора/MPPT, возможные естественные затенения от снега, загрязнений, деградации, простоев, потери от перезарядки АКБ.

Требуемая установленная мощность PV-панелей:

$$P_{PV} = \frac{E_{эл.баз} + E_{hp}}{Y_{spec} \cdot PR} \quad (2)$$

где: $E_{эл.баз}$ – годовая потребность в электрической энергии объекта; Y_{spec} – удельная выработка кВт·ч/кВт установленной мощности солнечных панелей, в год, для РК ~ 1200 – 1600 [8] для расчёта на зиму используется зимний коэффициент; Y_{spec} равный ≈ 35 – 55 % от среднегодового, при наклоне «широта+15°».

Выбор емкости аккумуляторной батареи для солнечных панелей производится по критическим нагрузкам и времени работы. Количество и емкость рекомендуется подбирать из условия запаса на темное время суток, 12 ч. Учитывая, что аккумуляторы желательно разряжать не более 70%-50%, установленная емкость АКБ должна быть на 70% больше. Например, для обеспечения 12 часовой работы нагрузки мощностью 100 Вт необходимо 2 аккумулятора по 100А·ч., которые должны иметь запас заряда $2400 \cdot 0,7 = 1700$ Вт·ч.

Технико-экономическая оценка выполняется по удельной приведённой стоимости, $LCOE_{el}$ (Levelized Cost of Electricity) и $LCON^{(input)}$, которая показывает себестоимость электрической энергий. Для этого, суммарные затраты за все годы действия проекта, включая капзатраты на: покупку, монтаж по цене на момент запуска установки в работу, годовые эксплуатационные затраты в последующие годы до окончания проекта делятся на суммарную электрическую энергию произведенной установкой за годы эксплуатации:

$$LCOE_{el} = \frac{C_{PV+BESS,0} + \sum_{t=1}^N \frac{C_{O\&M,t}^{PV+BESS} + C_{rep,t}^{PV+BESS}}{(1+r)^t} - \frac{SV_N^{PV+BESS}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{E_{del,t}}{(1+r)^t}} \quad (3)$$

где: $C_{PV+BESS,0}$ – начальные капитальные затраты на PV+BESS (солнечные панели, включая рамы/крепёж, трекары, опоры, балласт, систему управления. BESS (Battery Energy Storage System), аккумуляторная система накопления энергии, включая электронику;

$\sum_{t=1}^N \frac{C_{O\&M,t}^{PV+BESS} + C_{rep,t}^{PV+BESS}}{(1+r)^t}$ – сумма дисконтированных эксплуатационных расходов ($C_{O\&M,t}^{PV+BESS}$) и расходов на замену элементов ($C_{rep,t}^{PV+BESS}$) PV+BESS за весь срок проекта, N лет;
 $C_{O\&M,t}^{PV+BESS}$ – эксплуатационные затраты (O&M, t) на PV+BESS (фотоэлектрическая установка + аккумуляторная система);
 $C_{rep,t}^{PV+BESS}$ – затраты на замены (replacement costs) в подсистеме PV + аккумулятор в соответствующий год, t;
 $\frac{SV_N^{PV+BESS}}{(1+r)^t}$ – приведённая (дисконтированная) остаточная стоимость подсистемы PV+BESS в конце срока службы, через N лет. Деление на $(1+r)^t$ – показывает дисконтирование этой суммы к «нулевому» году по ставке «r»;
 $\sum_{t=1}^N \frac{E_{del,t}}{(1+r)^t}$ и $\sum_{t=1}^N \frac{Q_{heat,t}}{(1+r)^t}$ – сумма дисконтированной полезной электрической энергии за весь срок проекта, N лет.

Результаты исследований

Изменение стоимости солнечных моно-, поликристаллических и тонкопленочных солнечных панелей в 2010-2025 годы (рис. 1).

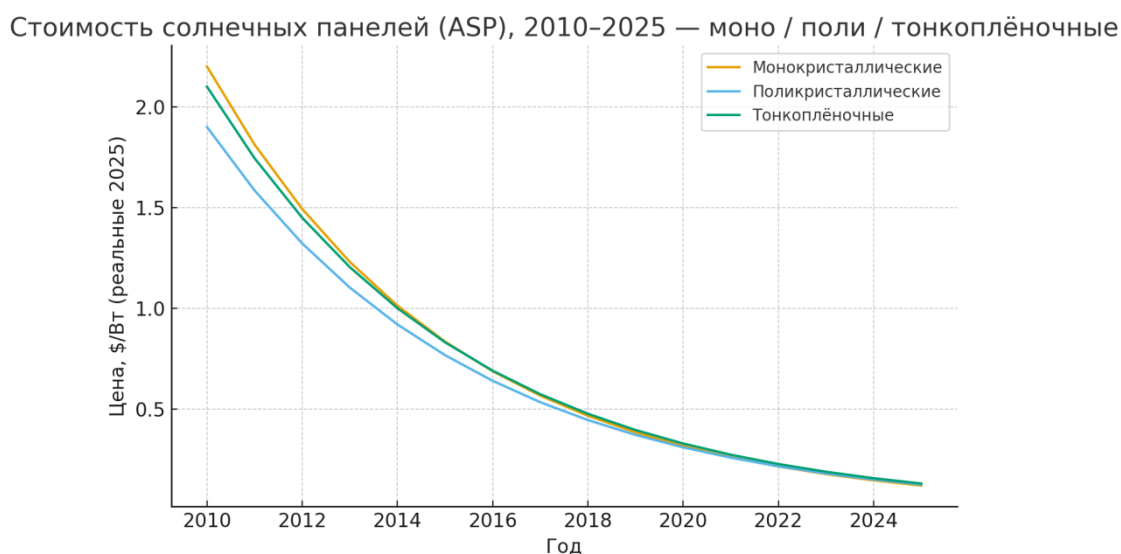


Рис. 1. – Графики изменения стоимости солнечных моно-, поликристаллических и тонкопленочных солнечных панелей в 2010-2025 годы

В принятые для анализа годы (2010-2025 гг.) наблюдались следующие тренды. Резкий рост спроса на солнечные панели, вызвал развитие технологий, увеличение производства панелей, что привело к экспоненциальному удешевлению по технологиям:

- монокристаллических (МКР), с 2.20 до 0.12 \$/Вт,
- поликристаллических (ПКР), с 1.90 до 0.125 \$/Вт,
- тонкопленочных, с 2.10 до 0.13 \$/Вт.

К 2025 году стоимости технологий выровнялись на уровне 0,12-0,13 \$/Вт

При этом, монокристаллические панели дают больше энергии одинаковой площади. КПД МКР-панели составляет ~20–23%, против ~17–19% у ПКР-панелей. Меньше затраты на металлоконструкцию, сваи, электрооборудование, монтажные работы, в среднем на 5...15%. У МКР меньше потери при высоких температурах, меньше температурный коэффициент расширения: ~–0.30...–0.35%/°C, против 0.38...–0.43%/°C у ПКР. Рынок ПКР стремительно упал, в то время, как индустрия перешла на МКР, что повысило надёжность и гарантию, проще с поставками, запчастями и техподдержкой.

Таким образом, выбираем монокристалл как базовую модель. При особых требованиях – очень дешёвая земля и монтаж, специфические климат/затенение или нишевые форм-факторы могут вызвать спрос на ПКР и тонколист. Нишевые форм-факторы – это не стандартные прямоугольные жёсткие модули 1.1–2.3 м², а специальные исполнения и габариты панелей, сделанные под особые задачи. Их выбирают не ради минимальной цены, а ради веса, гибкости, дизайна или интеграции в строительные конструкции.

Анализ графиков показывает (рис. 2).

В 2010 году и в последующие годы (до 2015–2016 гг), низкая конкурентоспособность солнечных PV+BESS модулей была обусловлена высокой стоимостью генерируемой электроэнергии.

В разрезе климатических зон Казахстана она составляла от ~\$0.62/кВт·ч на Юге РК, до ~\$0.71/кВт·ч в Центральном регионе, а в Северном регионе доходило, до ~\$0.80/кВт·ч.

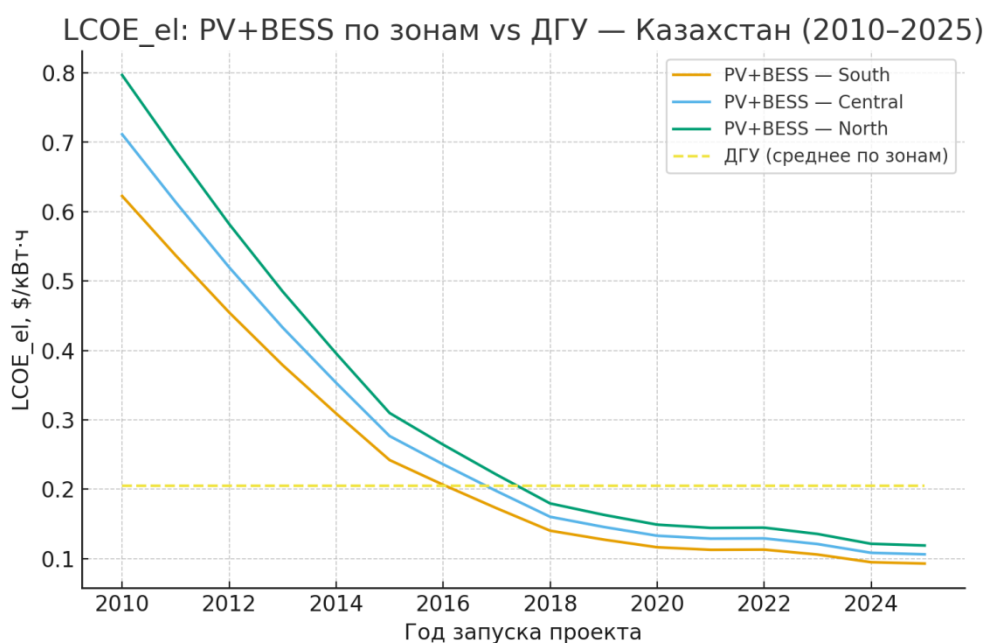


Рис. 2. – Графики сравнения изменений удельной приведённой стоимости (LCOE_{el}) солнечных МКР панелей и дизель генераторной установки (ДГУ) в 2010-2025 годы.

Энергия от ДГУ также была дорогой. Стоила около $\$0.20\text{--}0.21/\text{кВт}\cdot\text{ч}$, при цене на дизельное топливо $\sim \$0.54/\text{л}$. К 2025 году энергия от PV+BESS модулей резко подешевела: на Юге, до $\sim \$0.09$, в Центре, до $\sim \$0.11$, на Севере, до $\sim \$0.12/\text{кВт}\cdot\text{ч}$. Стоимость энергии от ДГУ практически не изменилась и осталась на уровне $\sim \$0.20\text{--}0.21/\text{кВт}\cdot\text{ч}$. Причина в том, что 80–90% себестоимости приходилось на топливо, которое пропорционально дорожало. В итоге, к 2025 г. стоимость энергии от PV+BESS системы стала в 1.7–2.3 раза дешевле дизеля.

Паритет цен по регионам РК наступал в разные периоды, которые видны на графиках LCOE_{el} . Точки пересечения графиков с линией ДГУ, показывают, что Южном регионе равновесие достигнуто, примерно, в 2015–2016 гг., в Центральном регионе 2016–2017 гг. и в Северном регионе, в 2017–2018 гг. В последующие годы энергия PV+BESS, по складывающемуся сценарию, по-видимому, будет продолжает дешеветь и разница с ДГУ будет стабильно расти.

Основные причины подобного тренда:

- Солнечные панели подешевели в $\sim 10\text{--}15$ раз за 15 лет.
- Аккумуляторы сильно подешевели и стали надёжнее, а их замена через ~ 12 лет уже сравнительно дешевле.
- В южном регионе, по сравнению с Центром и Севером поступает больше солнечной энергии, соответственно больше выработка PV+BESS модуля, что вносит вклад в пропорциональное снижение LCOE_{el} .
- У дизеля почти все текущие расходы идут на покупку дизельного топлива. Затраты на ремонт и замену деталей составляют малую долю от затрат на топливо, которые не влияют на итоговые затраты.

В качестве примера приведены графики влияния автономности BESS на LCOE_{el} по ценам 2025 года, для PV мощностью 30 кВт

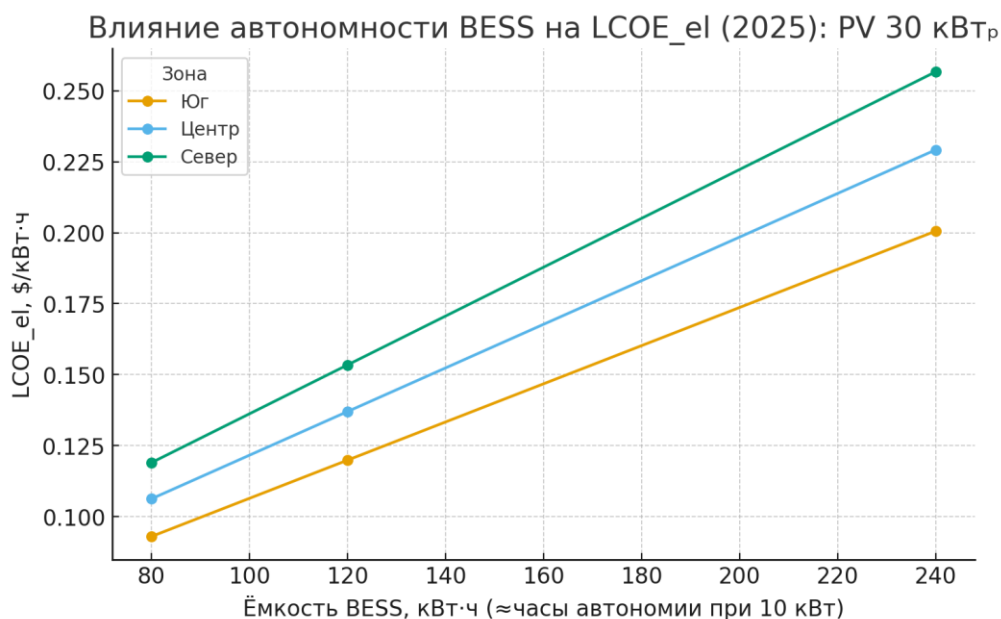


Рис. 3. – Графики зависимости LCOE_{el} PV+BESS модуля от продолжительности автономной работы (часы автономии при 10 кВт установленной мощности).

Выводы

На Юге, PV+BESS модуль достаточно эффективен в качестве базового источника генерации. Однако, для обеспечения надежности следует иметь резервный ДГУ, который будет включаться, как редкий резерв/пик.

В Центральном регионе, PV+BESS может служить, как основной источник. Для редких аварийных периодов отключения необходимы ДГУ.

На Севере страны, где меньше солнца к 2020-м PV+BESS модуль стал дешевле дизеля. Целесообразно, в качестве базовой иметь PV и резервный ДГУ.

Полученные результаты показывают, что при проектировании системы принять, чтобы она отвечала следующим исходным условиям:

- чтобы большую часть года электроснабжение осуществлялось от PV+BESS, а ДГУ работал как можно реже, и короче по времени;

- существенная доля $LCOE_{el}$ приходится на покупку и эксплуатацию BESS, Поэтому, важной является задача оптимизации емкости батарей, при обеспечении требуемой автономной работы в течении ~8–12 ч в зимний период;

на величину $LCOE_{el}$ влияет качество монтажа, PR - перфоманс-рейтинг, деградация. Это, скрытые резервы энергоэффективности и экономии средств.

Общие издержки могут снизить, если дополнительно вырабатывать холод. Система позволяет это через реализацию энергетической связки ФЭС+тепловой насос (ТН), или PV+BESS+ТН. Дополнительно получаемые тепловая энергия и холод будут вкладом в суммарные доходы.

Список литературы

1 Указ Президента Республики Казахстан от 2 февраля 2023 года № 121. Об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121>

2 M. Jesper, F. Pag, K. Vajen et al Hybrid solar thermal and heat pump systems in industry: Model based development of globally applicable design guidelines. Solar Energy Advances. Volume 3, 2023, 100034. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667113123000025>

3 7 A. Ramos, I. Guarrancino, A. Mellor, D. Alonso-Álvarez, P. Childs, N. J. Ekins-Daukes and C. N. Markides, "Solar-Thermal and Hybrid Photovoltaic-Thermal Systems for Renewable Heating," Grantham Institute, London, 2017.

4 International Energy Agency, "Renewables Information: Overview," IEA Publishing, 2019.

5 International Energy Agency, "Technology roadmap: Solar heating and Cooling," IEA Publishing, 2012.

6 GLOBAL WIND ATLASENERGYDATA.INFO / https://globalsolaratlas.info/map?c=50.597186,65.742188,5&m=site&s=50.729502,71.51001&utm_source=chatgpt.com

7 Performance Ratio / https://www.pvsyst.com/help-pvsyst7/performance_ratio.htm

ЖЕЛ ТУРБИНАЛАРЫН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, ЕКІ АЙМАҚТЫҚ ЖЕЛІДЕГІ ЖИІЛІКТІ РЕТТЕУДІ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Темірханұлы Ж., Наурыз Б.К.

КЕАҚ «Алматы энергетика және байланыс университеті», Қазақстан, Алматы,
z.temirkhanuly@aes.kz; bau.nauрыз@aes.kz

Аңдатпа: Бұл мақала жел турбиналарының екі аймақтық энергия жүйесін жиілікті реттеуге қатысуын зерттеуге және оңтайландыруға арналған. Жаңартылатын энергия көздерінің өсіп келе жатқан үлесі жағдайында тұрақтылық пен сенімділікті сақтау үшін олардың энергия жүйесіне интеграциялануын қамтамасыз ету өте маңызды. Зерттеу барысында жел турбиналарының модельдерін қамтитын екі энергетикалық жүйенің математикалық моделі жасалды. Жүйелердің жиілік өнімділігін жақсарту үшін жел турбиналарын басқарудың әртүрлі стратегиялары ұсынылды және сыналды. Оңтайландыру әдістерін қолдана отырып, жел турбиналарын басқарудың оңтайлы параметрлеріне қол жеткізілді, жиілікті реттеудің ең жақсы көрсеткіштерін қамтамасыз етті. Зерттеу нәтижелері жел турбиналарын пайдалану жағдайында екі электр желісінің жиілік тұрақтылығының алғашқы жақсарғанын көрсетті.

Мақалада жел турбиналарын модельдеудің жаңа тәсілі екі аймақтық электр жүйесінде олардың жиілігін реттеуді дәлірек талдау үшін ұсынылды және жел турбиналарын басқару стратегиясы әзірленді, ол энергия жүйесінен бөлек шектеулерді ескереді және екі аймақтық схемада тиімді жиілікті реттеуді қамтамасыз етеді. Жел турбиналарын басқару алгоритмі әртүрлі жұмыс режимдерінде екі аймақтық электр желісіндегі жиіліктің ауытқуын азайту үшін оңтайландырылған және жоғары шекті жиілікті реттеуді оңтайландыруға мүмкіндік беретін екі аймақтық электр жүйесінің кешенді моделі ұсынылды.

Кілтті сөздер: Жел турбиналары, оңтайландыру, жаңартылатын энергия көздері, желілік тербелістер, электр желісінің динамикасы, адаптивті басқару, электрмен жабдықтаудың сенімділігі.

Кіріспе: Жаңартылатын энергия көздері (ЖЭК) қазба отындарының сарқылуына және олардың қоршаған ортаға кері әсеріне байланысты қазба отындарына перспективалы балама болып табылады [1]. Қуат жүйесінің жиілігі жүктеменің үздіксіз өзгеруіне және басқа да ауытқуларға байланысты оның номиналды мәнінен ауытқиды [2]. Кәдімгі синхронды генераторлардың (СГ) роторларында жинақталған кинетикалық энергия (КЭ) бастапқы және қайталама жиілікті реттеу ілмектерінің жұмысына дейін жүктеменің қалыпты өзгеруіне шыдайды [3]. ЖЭК-тің жоғары енуі бар энергетикалық жүйелерде ЖЭК-тің жоғарылауымен тән инерцияның төмендеуіне байланысты КЭ аз болады [4].

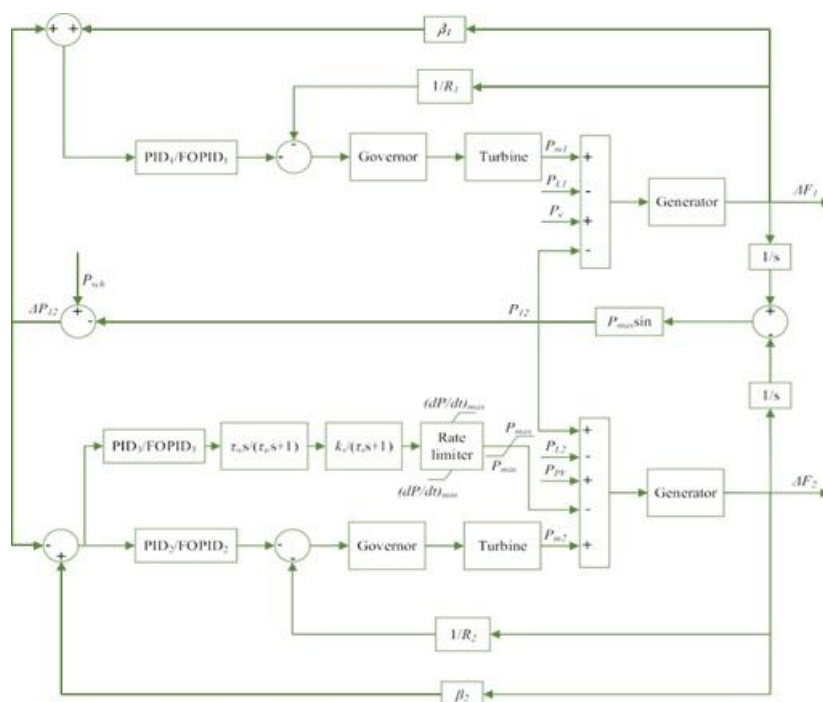
Осылайша, қуат жүйесінің тұрақтылығы мен жиілікті реттеудегі проблемалар туындауы мүмкін [3; 4]. Бұл жұмыста екі аймақтық электр жүйесі үшін жиілікті қолдау үшін ЖЭК және энергия сақтау құрылғыларын бөлу талқыланады. FREQUENCY қолдауы жаңа оңтайландыру алгоритмімен, атап айтқанда COOT оңтайландыру алгоритмімен (COA) жүзеге асырылады. COA бөлшек ретті пропорционалды интегралды туынды (PID) контроллерлерінің, жуу сүзгісінің контроллерінің және түсіру контроллерінің оңтайлы параметрлерін бөлуде сенімді.

Электр энергетикасын дамытудың қазіргі тенденциялары энергия теңгеріміндегі ЖЭК үлесінің ұлғаюымен сипатталады. Жел энергетикасы, ең перспективалы ЖЭК бірі ретінде, бүкіл әлемнің энергия жүйелеріне белсенді интеграциялануда. Алайда, жел электр станцияларының (ЖЭС) генерациясының өзгермелі сипаты электр желісінің тұрақты жұмысын қамтамасыз ету үшін жағдай жасайды, әсіресе жиілікті реттеу бөлігінде. Берілген шектерде жиілікті сақтау электр энергетикалық жүйесінің сенімді кернеуі үшін міндетті шарт болып табылады. Осыған байланысты жел турбиналарын басқару әдістерін әзірлеу, оларға жиілікті реттеу процесіне қатысуға мүмкіндік беру өзекті топ болып табылады.

Энергия жүйелеріндегі жиілікті реттеу міндеті ерекше күрделілік болып табылады, ол күрделі құрылымды білдіреді, мысалы, аймақтар арасындағы өзара әрекеттесу тұрақтылыққа әсер ететін екі аймақтық электр жүйелерінде. Бұл жұмыс жел турбиналарының екі аймақтық электр желісін жиілікті реттеуге қатысуын оңтайландыру тәсілін ұсынады. Жұмыстың мақсаты жел турбиналарын адаптивті басқару арқылы екі аймақтық электр желісінің жиілік тұрақтылығын арттыру болып табылады.

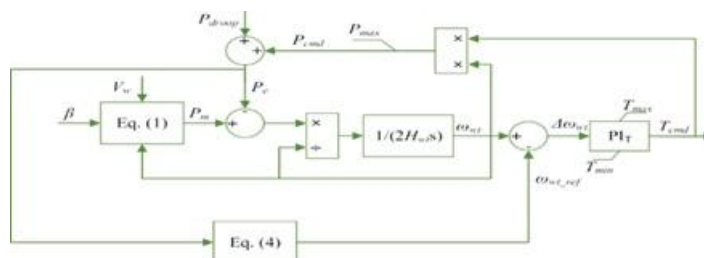
Материалдар мен әдістері: Мақалада оңтайландыру мақсатында энергия жүйесіндегі жиіліктің ауытқуын азайту мақсатында жел турбиналарын (қалақтардың көлбеу бұрышы, реттегіш коэффициенттері) басқарудың оңтайлы параметрлерін анықтау үшін оңтайландыру алгоритмдерін (мысалы, генетикалық алгоритм, бөлшектер алгоритмі, градиент әдістері) қолданамыз.

Зерттеуге ұсынылған электр желісі екі аймақтық құрылымға ие, оның схемасы 1-суретте көрсетілген. Оның құрамына 3 типті жел турбиналары және фотоэлектрлік қондырғылар сияқты сенімді энергия көздері ЖЭК кіреді. Бірінші аймақ келесі энергия балансына сәйкес келеді: генерациялау қуатының 50% дәстүрлі бу турбинасында пайда болады (шығыс қуаты P_{m1} деп белгіленеді), ал 50% жел электр станциялары арқылы беріледі (1-суретте P_e деп белгіленген айнымалы жылдамдықты жел турбинасының шығыс электр қуаты). Екінші аймақ, керісінше, 80% дәстүрлі гидротурбиналардан (P_{m2} шығыс қуаты) және 20% күн электр станцияларынан тұрады (күн генерациясы 1-суретте P_{PV} ретінде ұсынылған).



1 сурет – Зерттелген екі аймақтық электр жүйесінің блок-сұлбаасының моделі

Модельдеу үшін бұл жұмыста 3,6 МВт қуат өндіретін 3 типті жел қондырғысы (ЖЭУ) қолданылады. Бұл орнатудың егжей-тегжейлі параметрлерін 5 дерек көзінен аламыз. 3 типті ЖЭУ құрылымын егжей-тегжейлі көрсететін схемалар 2-суретте қакрастырылған. Дәл осы модельді таңдау әр түрлі нұсқаларда екі аймақтық электрмен жабдықтау жүйесінің динамикалық тұрақтылығын зерттеуді қажет етті.



2 сурет – Ұсынылған 3 типті жел турбинасының блок-сұлбасының моделі

ЖЭК өндірілетін электр энергиясының суретте көрсетілген жүйе параметрлеріне тәуелділігі:

$$P_m = 0,5 \cdot \rho \cdot A_{wt} \cdot V_w^3 \cdot C_p. \quad (1)$$

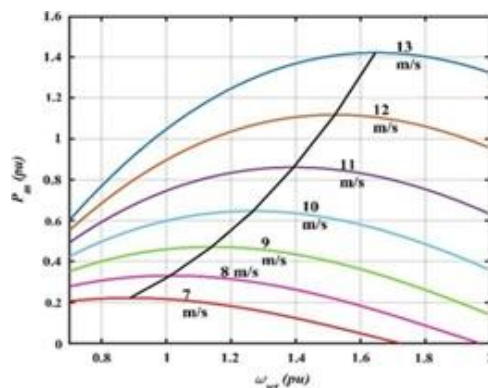
Ауа тығыздығы ρ (кг/м³) берілген модельдегі параметр болып табылады. A_{wt} (м²) деп белгіленген жел генераторы қалақтарының қамту аймағы да байқалады. Желдің жылдамдығы V_w 11 м/с-қа тең тұрақты шамада қабылданады, турбинаның энергетикалық тиімділігі басқа өрнекпен анықталатын пайдалы әсер коэффициентін C_p көрсетеді:

$$C_p = \sum_{k=0}^4 \sum_{n=0}^4 \alpha_{k,n} \lambda^n \beta^k \quad (2)$$

Бұл жағдайда β жел турбинының қалақшасын орнату бұрышын білдіреді, ал $\alpha_{k,n}$ коэффициенттері мәндерін 5 дерек көзіндегі тұрақты шамаларды білдіреді. Жел турбины қалақшасының соңындағы жылдамдықтардың қатынасы (λ) ретінде анықталады. Жел турбины қалақшасының соңындағы жылдамдықтардың қатынасы (λ) ретінде анықталады:

$$\lambda = \frac{K_b \cdot \omega_{wt}}{V_w} \quad (3)$$

Бұл модельде жел турбины роторының бұрыштық жылдамдығы ω_{wt} , ал ротордың (жел дөңгелегінің) радиусы K_b деп белгіленеді. Жел турбины шығаратын өнеркәсіптік қуаттың желдің әртүрлі жылдамдықтарындағы ротордың айналу жылдамдығына тәуелділігі графикте 3-суретте көрсетілген.

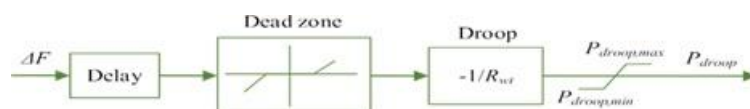


3 сурет – Ұсынылған 3 типті жел турбинының шығыс механикалық қуаты желдің белгілі бір айналу жылдамдығына қатынасы

Максималды қуат алу функциясы келесі өрнектің көмегімен жуықталуы мүмкін:

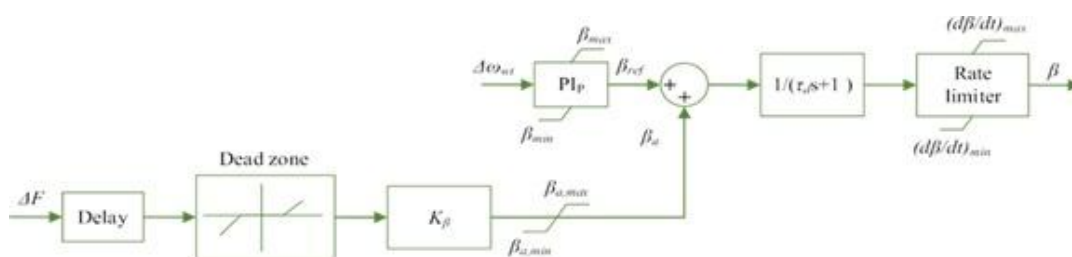
$$\omega_{wt\_ref} = 1,6P_e^3 - 2,7P_e^2 + 2,3P_e + 0,45. \quad (4)$$

(4) теңдеу жел турбинының ток жылдамдығы (ω_{wt_ref}) мен оның электр қуаты арасындағы байланысты сипаттайды. Жел турбинының жұмыс жылдамдығының диапазоны шектеулі: максималды мән - 1,2 о.е., минимум - 0,7 о.е. 4-суретте ΔF_1 аймағындағы жиіліктің ауытқуына (F) байланысты P_d сигналын беретін дыбыс деңгейі контроллерінің жұмысын имитациялайтын сұлба берілген. Функцияның салбырауын реттегіші, ұқсас синхронды генератордың салбырауын реттегіші (СГ) [3; 5], ΔF_1 жиілігінің ауытқу белгісіне байланысты 3 типті жел турбины роторының айналуын жеделдету немесе баяулату.



4 сурет – Ұсынылған 3 типті жел турбинасының көлбеу реттегіші

5-суретте көрсетілген желдің жоғары жылдамдығында шығыс қуатының номиналды қуаттан асып кетуіне жол бермейтін көлбеу бұрыш реттегіші. β_{ref} жылдамдығының ауытқу сигналы - бұл ротор желісінің рұқсат етілген жылдамдығынан асып кетуіне жол бермейтін пышақтардың міндетті бұрышы. Қалыпты жылдамдықта β_{ref} жел пайда болады, бірақ желдің номиналды жылдамдығынан асып кетсе, ол оң мәнге ие болады. β_a сигналы, керісінше, шығыс қуатын реттеу, оны теріс ΔF мәндерінде жоғарылату және азайту үшін қолданылады. 4 және 5-суреттерде алынған P_{droop} және β сигналдары 2-суретте көрсетілген VSWT моделі үшін кіріс болып табылады.



5 сурет – Ұсынылған 3 типті жел турбинасының қадам бұрышының реттегіші

Қарастырылып отырған екі аймақтық энергия жүйесінің құрамына гидро және бу турбиналық қондырғылар кіреді. Бу турбинасының математикалық сипаттамасы келесі формада болатын беріліс функциялары түрінде ұсынылған:

Турбина моделі:

$$\frac{F_{HP} T_{RH} s + 1}{(T_{RH} s + 1)(T_{CH} s + 1)}; \quad (5)$$

Губернатор моделі:

$$\frac{1}{T_G s + 1}; \quad (6)$$

Генератор моделі:

$$\frac{1}{2H_1 s + D_1}. \quad (7)$$

Бу турбинасының моделі 7 дерек көзінде берілген сипаттамаға сәйкес аралық қызып кетудің бір сатысын ескере отырып жасалған. T_{RH} және T_{SH} параметрлері сәйкесінше жылытқыш пен басқару клапанының жұмыс уақытына

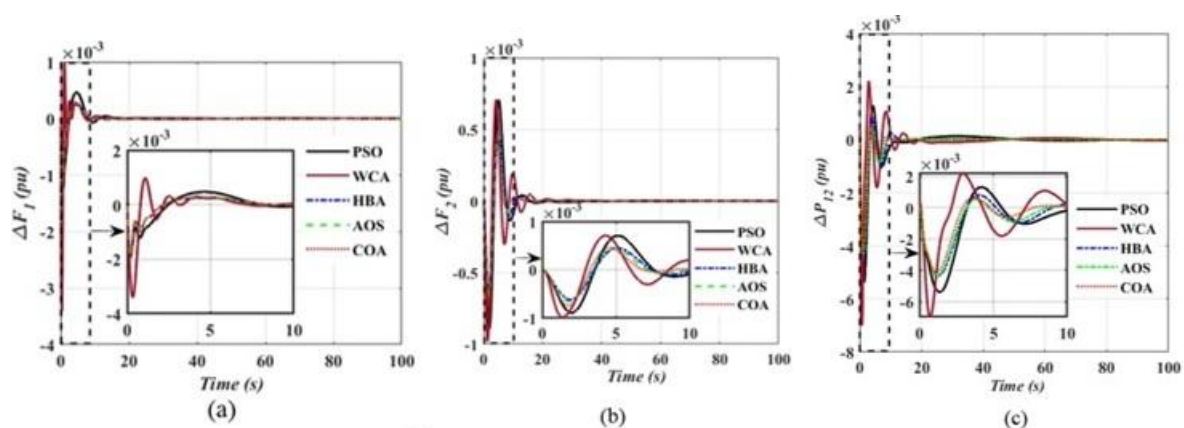
сәйкес келеді, ал F_{HP} жоғары қысым қадамын өзгерту арқылы ағынның үлесін анықтайды. Реттегіш динамикасы тұрақты T_G уақытын көрсетеді. Генератор тербеліс теңдеулерімен ұсынылған, мұнда H_1 инерцияны сипаттайды, ал D_1 – жүктеменің демпферлік коэффициенті.[6]

Нәтижелер және талқылау: Әрі қарай, жоғарыдағы бөлімде сипатталған бағдарламалық жүйенің әртүрлі жұмыс режимдерін модельдеу мысалдары келтірілген. Модельдеу MATLAB/SIMULINK 2018b ортасында жүзеге асырылды. 1 және 2 сценарийлерде салыстырмалы талдау жүргізу үшін коэволюциялық оңтайландыру әдісі (COA) қолданылады. Нәтижелердің сенімділігі, алынған түпнұсқалық сертификаты 3 және 4 тізбектерде өлшенеді. Оптимизаторлардың жұмысын объективті қарау үшін төменгі және жоғарғы шекаралардың параметрлерін, сондай-ақ дисплей өлшемін анықтау барлық алгоритмдерге байланысты. Әрбір оптимизатор үшін итерациялардың жалпы саны 100 құрайды. Бұл тізбектер PID реттегіштерінің оңтайлы параметрлерін, сүзгінің кешігу уақытын (τ_w), көлбеу бұрышын реттегіштің күшейту коэффициентін (K_β) және ротордың демпферін (R_{wt}) анықтау үшін оңтайландыруды жүзеге асырады. Интегралды квадраттық ауытқуды (ISE) азайту үшін 100 итерация кезінде бес оңтайландырғыш қолданылды: PSO, WCA, HBA, AOS және COA. Алынған ISE мәндері $2,6307 \times 10^{-5}$ (COA), $3,1371 \times 10^{-5}$ (AOS), $3,3435 \times 10^{-5}$ (HBA), $5,1316 \times 10^{-5}$ (WCA) және $5,3451 \times 10^{-5}$ (PSO) болды. Әрбір оптимизатор үшін алынған параметрлердің оңтайлы мәндері 1-кестеде келтірілген.

1 кесте – PID контроллерлерінің параметрлері

Parameter	PSO	WCA	HBA	AOS	COA
K_P	-1.5710	-2.5854	-3.0000	-3.0000	-3.0000
K_d	-2.9629	-0.6201	-3.0000	-3.0000	-2.8049
K_i	-2.5130	-2.7656	-3.0000	-3.0000	-2.9959
K_{P2}	-1.2623	-1.6248	-3.0000	-3.0000	-0.4804
K_{d2}	-2.0399	-1.3508	-3.0000	-3.0000	-2.7286
K_{i2}	-0.8412	-0.6896	-0.4000	-0.5696	-0.53057
K_{P3}	-2.8177	-0.8436	-3.0000	-3.0000	-2.3027
K_{d3}	-1.0046	-0.9239	-3.0000	-1.8042	-0.4000
K_{i3}	-2.4193	-2.8433	-3.0000	-3.0000	-2.9397
τ_w	29.7104	7.3959	30.0000	30.0000	14.7056
K_β	27.1451	18.0232	41.7032	50.0000	10.0000
R_{wt}	0.1745	0.2006	0.3000	0.1686	0.101994

7-суретте жүйеде пайда болатын өтпелі үрдістер (ΔF_1 , ΔF_2 және ΔP_{12}) 1-аймақтағы жүктеменің 0,05 о.е. артуына жауап ретінде көрсетілген.



7 сурет – PID контроллері а) ΔF_1 , б) ΔF_2 , в) ΔP_{12} қоса алғанда, 1-аймақтағы + 0,05 pu қадамдық жүктеменің өзгеруіне байланысты жүйелік жауаптар

COA жағдайы үшін 1 және 2 (ΔF_1 , ΔF_2) аймақтарындағы жиіліктің және байланыс желісіндегі қуаттың (ΔP_{12}) максималды ауытқулары $-1,97 \times 10^{-3}$ о.е., $-7,4 \times 10^{-4}$ о.е. және $-4,13 \times 10^{-3}$ о.е. сәйкесінше. Нәтижелерді салыстыру COA-мен алынған 1-аймақтағы (ΔF_1) жиіліктің максималды ауытқуы WCA-мен салыстырғанда 72,6% - ға аз екенін көрсетті. Сонымен қатар, COA PSO және WCA (тиісінше 20,27% және 32,43%) және PSO, WCA, HBA және AOS (30,5%, 69,98%) салыстырғанда байланыс желісіндегі (ΔP_{12}) ең төменгі максималды ауытқуларды салыстырғанда 2 (ΔF_2) аймақтағы жиіліктің ең төменгі ауытқуларын қамтамасыз етеді., Сәйкесінше 5,09% және 3,9%). Бұл нәтижелер COA басқа оңтайландырғыштармен салыстырғанда ең аз ISE мәнін, сондай-ақ жиілік пен қуаттың максималды ауытқу мәндерін қамтамасыз ететінін растайды. Осылайша, COA берілген жүйеде PID реттегіштерін орнатудың ең тиімді және сенімді алгоритмі болып табылады.[7;8]

Қорытынды: Мақалада екі аймақтық электр желісіндегі жиілікті реттеуді жақсарту үшін ұсынылған жүйе және тиімділікті оңтайландыру әдістері қарастылды. Мұнда жел турбиналарын оңтайландырылған басқару жүктеме бұзылыстарында жиілік шығарындыларын айтарлықтай азайтуға мүмкіндік береді. Әзірленген оңтайландыру COA алгоритмі ISE критерийі бойынша басқа алгоритмдермен салыстырғанда жақсы нәтиже көрсетті және жиіліктің максималды ауытқуларын азайтты. PID реттегіштерінің, көлбеу бұрышының реттегішінің және ротордың демпферінің оңтайландырылған параметрлері электр желісінің тұрақтылығын арттыруға ықпал етеді. Ұсынылған тәсіл жел генерациясының өсіп келе жатқан үлесі жағдайында энергиямен жабдықтаудың сенімділігі мен тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері әзірленген әдістердің тиімділігі мен өз электр желісіне қолданылуын растайды.[9; 10]

Пайдаланылган деректер тізімі:

1. **Robles E., Haro Larrode M., Santos Mugica M., Etxegarai A.** Comparative analysis of European grid codes relevant to offshore renewable energy installations [Текст] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – Т. 102. – С. 171–185. – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.002>
2. **Tang Z.X., Lim Y.S., Morris S., Yi J.L., Lyons P.F., Taylor P.C.** A comprehensive work package for energy storage systems as a means of frequency regulation with increased penetration of photovoltaic systems [Текст] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2019. – Т. 110. – С. 197–207. – <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.03.002>
3. **Fernández Guillamón A., Gómez Lázaro E., Muljadi E.** Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time [Текст] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – Т. 115. – 109369. – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109369>
4. **Fini M.H., Golshan M.E.** Frequency control using loads and generators capacity in power systems with a high penetration of renewables [Текст] // Electric Power Systems Research. – 2019. – Т. 166. – С. 43–51. – <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.09.010>
5. **Cheng Y., Azizipanah Abarghooee R., Azizi S., Ding L., Terzija V.** Smart frequency control in low inertia energy systems based on frequency response techniques: A review [Текст] // Applied Energy. – 2020. – Т. 279. – 115798. – <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115798>
6. **Persson M., Chen P.** Frequency control by variable speed wind turbines in islanded power systems with various generation mix [Текст] // IET Renewable Power Generation. – 2017. – Т. 11, № 8. – С. 1101–1109. – <https://doi.org/10.1049%2Fiet-rpg.2016.0350>
7. **Naruei I.** A new optimization method based on COOT bird natural life model [Текст] // Expert Systems with Applications. – 2021. – Т. 183. – 115352. – <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115352>
8. **Akram U., Nadarajah M., Shah R., Milano F.** A review on rapid responsive energy storage technologies for frequency regulation in modern power systems [Текст] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – Т. 120. – 109626. – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109626>
9. **Tielens P., Van Hertem D.** The relevance of inertia in power systems [Текст] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Т. 55. – С. 999–1009. – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.016>
10. **Datta U., Kalam A., Shi J., Zayegh A.** Battery energy storage system control for frequency regulation in microgrid power systems [Текст] // Energies. – 2020. – Т. 13, № 9. – 2199. – <https://doi.org/10.3390/en13092199>

СЕКЦИЯ 3 «СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ВОПРОСЫ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ТЕПЛОВОЙ И АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ»

УДК [621.181:697.326]:662.951.2

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАЛОМОЩНЫХ КОТЛОВ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА

**Амренова А.Ж. *, Достияров А.М., Яманбекова А.К.,
Умышев Д.Р., Дүйсенбек Ж.С.**

Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева,
г. Алматы, Казахстан

*e-mail: a.amrenova@au.es.kz

В условиях растущих требований к энергоэффективности и экологичности энергетических систем особую актуальность приобретают задачи модернизации и оптимизации теплотехнического оборудования. Казахстан, обладая значительными углеводородными ресурсами и развивающейся энергетической отраслью, стоит перед необходимостью внедрения решений, направленных на сокращение выбросов загрязняющих веществ. Эта задача обусловлена как национальной экологической политикой, так и международными обязательствами в рамках климатических соглашений.

Водогрейные котлы, обеспечивающие централизованное теплоснабжение жилых и промышленных объектов, занимают ключевое место в энергетической инфраструктуре страны. Однако при их эксплуатации в атмосферу выбрасываются вредные продукты сгорания – оксиды азота (NO_x), угарный газ (CO), сажа и другие вещества, оказывающие негативное влияние на окружающую среду. В современных условиях повышения требования по вопросам экологического и экономического плана становится актуальной эксплуатация высокоэкономичных водогрейных котлов [1].

Для обеспечения минимизации выбросов необходимо усовершенствовать процессы горения и повышать производительность теплоиспользующих установок [2, 3]. Организация микрофакельного сжигания необходимо интенсификация процессов горения [4].

В связи с этим разработка горелочных систем, способных эффективно снижать концентрации загрязняющих компонентов в отходящих газах, представляет собой одну из приоритетных задач в области технического совершенствования оборудования теплогенерации.

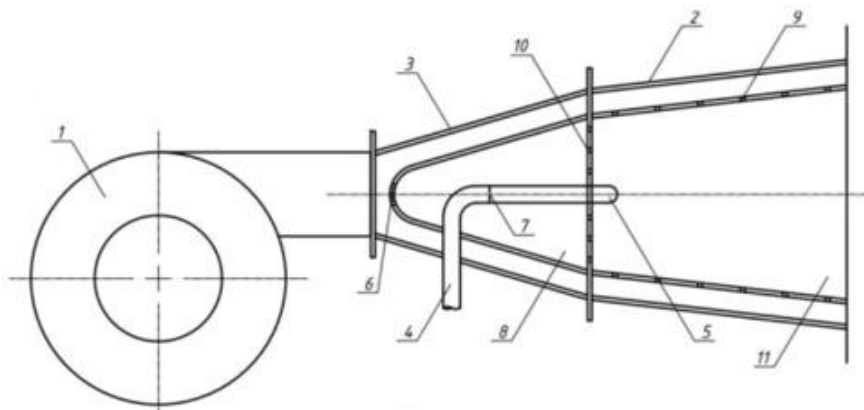
С целью повышения экологической эффективности малых водогрейных котельных агрегатов и снижения уровня токсичных выбросов в атмосферу в

рамках выполнения проекта №AP19680488, финансируемого Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан, было разработано оригинальное техническое решение и получен Патент на изобретение №37126 «Горелочное устройство со ступенчатым подводом воздуха» [5].

Задача данного изобретения заключается в создании эффективной, экономически выгодной и промышленно применимой горелочной установки со ступенчатым подводом воздуха для использования в камерах сгорания газотурбинных установках, в печах для сжигания газообразного топлива в малых водогрейных агрегатах.

Ожидаемый технический результат – эффективная, экономичная и простая конструкция горелочной установки со ступенчатым подводом воздуха, обеспечивающая снижение вредных выбросов, расширение диапазона регулирования мощности горелки, снижение гидравлических потерь за счет интенсификации процесса смесеобразования при ступенчатом сжигании топлива, а также улучшение технологических и экологических показателей печи без необходимости сложных процессов изготовления, обслуживания и ремонта.

Для достижения технического результата горелочное устройство со ступенчатым подводом воздуха содержит полый корпус 2, выполненный в форме диффузора и имеет две камеры: камеру предварительного смешения 8 и камеру горения 11, разделенные перфорированной пластиной 10. При этом камера предварительного смешения 8, расположена в коническом переходнике 3, к которому подсоединен вентилятор 1 и имеет отверстия подвода воздуха 6, а камера горения имеет отверстия для ступенчатой подачи воздуха 9 расположенные на внутренней стенке полого корпуса устройства. А также содержит газоподводящую трубу 4, которая имеет отверстия подачи газа в камеру предварительного смешения 7 и сопло выпуска газа 5 в камеру горения 11 (Рисунок 1).



1 – вентилятор; 2 – корпус; 3 – конический переходник; 4 – газоподающая труба; 5 – сопло выпуска газа; 6 – отверстия для ступенчатой подачи воздуха в камеру предварительного смешения; 7 – отверстия подачи газа в камеру предварительного смешения; 8 – камера предварительного смешения; 9 – отверстия для ступенчатой подачи воздуха в камеру горения; 10 – перфорированная пластина; 11 – камера горения.

Рисунок 1. – Горелочное устройство со ступенчатым подводом воздуха

Преимуществами разработанной конструкции горелочного устройства являются высокая эффективность процесса сжигания и экономичность, достигаемые при сохранении простоты изготовления и удобства эксплуатации. Основное назначение устройства заключается в повышении энергетической эффективности маломощных водогрейных котельных агрегатов, увеличении их КПД и снижении объёма выбросов загрязняющих веществ, в первую очередь оксидов азота и угарного газа.

Для реализации указанных преимуществ в конструкции горелки предусмотрена двухкамерная схема со ступенчатым подводом воздуха, обеспечивающая эффективное смесеобразование и контроль за процессом горения. Так, газ поступает по газоподающей трубе 4, частично направляясь через отверстия 7 в камеру предварительного смешения 8, где образуется первичная газовоздушная смесь. Остальная часть топлива поступает в камеру горения 11 через сопло 5. Перфорированная пластина выполняет функцию стабилизатора пламени и одновременно способствует снижению задымленности и токсичности продуктов сгорания.

Ступенчатый подвод воздуха осуществляется через отверстия 9, расположенные в стенках корпуса камеры горения. Первичный воздух смешивается с топливом в камере предварительного смешения, образуя бедную смесь, горение которой происходит в радиальном направлении через отверстия перфорированной пластины. Вторичный воздух подаётся непосредственно в камеру горения, где обеспечивает догорание топлива в диффузионном факеле. Такой режим поддерживает температуру ниже 1500 °С, что существенно ограничивает образование термических NOx.

Диффузионная форма устройства способствует переходу горения в автомодельный режим, при котором соотношение воздуха и топлива в камере смешения регулируется объёмом подаваемого вторичного воздуха. В отличие от конструкций с завихрителями и сложными перфорированными элементами, данное решение снижает гидравлические потери и расширяет диапазон устойчивого горения.

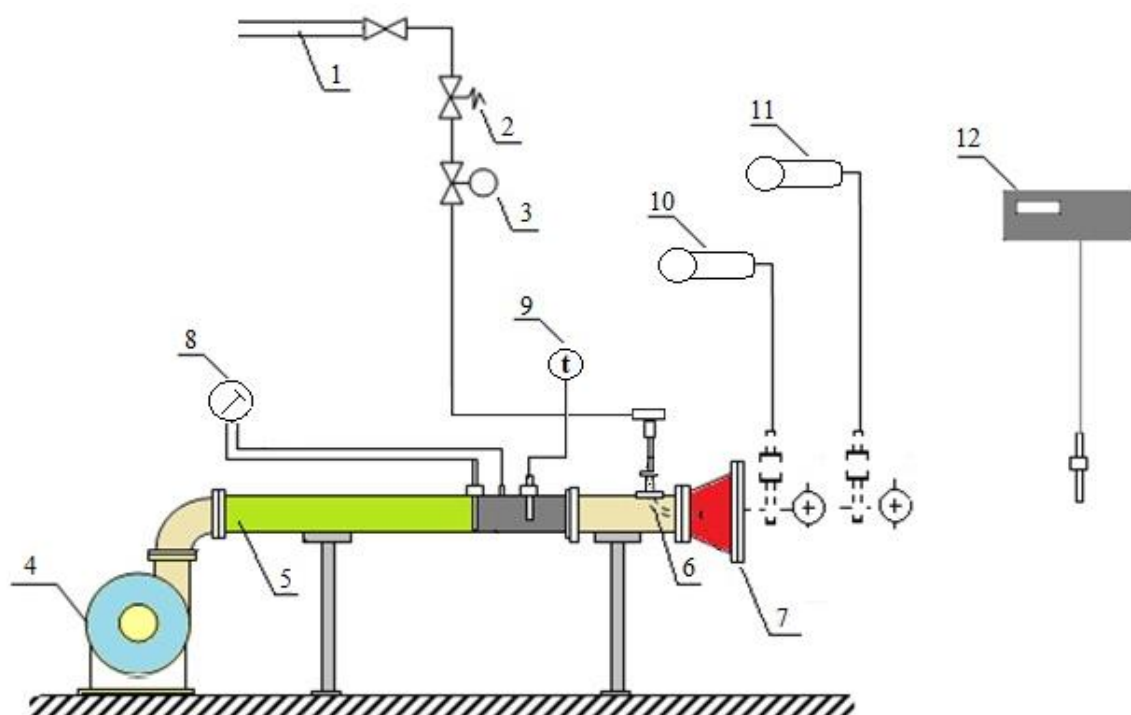
Предварительное смешение топлива с воздухом известно как эффективный способ снижения концентрации токсичных выбросов, однако данный метод ограничивает диапазон устойчивого горения. Использование диффузионной подачи топлива позволяет компенсировать этот недостаток и расширить режимные возможности горелки.

В отличие от конструкций с завихрителями и перфорированными поверхностями, которые повышают гидравлические потери, предложенное устройство обеспечивает снижение сопротивления за счет отказа от таких элементов и подачи части топлива непосредственно в камеру горения.

Таким образом, реализованный принцип ступенчатого подвода воздуха интенсифицирует процесс смесеобразования, что ведет к снижению вредных выбросов, уменьшению гидравлических потерь и расширению диапазона регулирования мощности горелки. Дополнительным преимуществом является

простота конструкции, ее технологичность и экономичность, что повышает эксплуатационную надежность установки.

Экспериментальные исследования работы горелочного устройства со ступенчатым подводом воздуха выполняются на специализированном экспериментальном стенде (рисунок 2) [6, 7], размещённом на территории ТОО «Казкотлосервис». Конструкция стенда включает огневую камеру, моделирующую условия работы камеры сгорания топливосжигающей установки, с учётом особенностей распределения воздуха в зоне горения.



1 – топливоподающий трубопровод; 2 – клапан; 3 – газовый счетчик; 4 – вентилятор; 5 – стабилизирующий трубопровод; 6 – топливоподающая трубка; 7 – стабилизаторы; 8 – многофункциональная измерительная система Testo-454; 9 – контактный термометр Fluke 52 II; 10 – термопара хромель-капель; 11 – термопара хромель-алюмель; 12 – газоанализатор Testo-350.

Рисунок 2. – Экспериментальный стенд для исследования фронтных и горелочных устройств

Ожидается, что экспериментальные исследования позволят определить оптимальные режимы работы горелочного устройства со ступенчатым подводом воздуха, подтвердить его эффективность в снижении образования оксидов азота и улучшении экологических характеристик процесса горения. Предложенная конструкция сочетает простоту изготовления с высокой надёжностью и может быть рекомендована для внедрения в маломощные водогрейные котельные агрегаты.

Список использованных источников

1. Орумбаев, Р. К. «Исследование, разработка и организация серийного производства водогрейных котлов нового поколения»: дисс. д.т.н. – Алматы, 2002. – 253 с.
2. Бельская, Т. И. О выборе горелочных устройств для котлоагрегатов малой мощности при реконструкции муниципальных котельных и других топливосжигающих установок. Омский научный ВЕСТНИК №1, 2016.
3. Roslyakov, P. V., Proskurin, Y. V., Khokhlov, D. A. Development of combined low-emissions burner devices for low-power boilers. Therm. Eng. 64, 574–584 (2017). <https://doi.org/10.1134/S0040601517080092>
4. Сударев, А. В., Маев, В. А. Камеры сгорания газотурбинных установок. Интенсификация горения. – Л.: Недра, 1990. – 274 с.
5. Умышев Д.Р., Достияров А.М., Амренова А.Ж., Дүйсенбек Ж.С., Кибарин А.А., Коробков М.С. «Горелочное устройство со ступенчатым подводом воздуха». Патент на изобретение РК, №37126, 10.01.2025, бюл. №2.
6. Яманбекова А.К. Разработка и исследование компактного теплогенератора с двухтопливной воздушной форсункой: дис. на соискание степени доктора философии (PhD): 6D071700 – Теплоэнергетика – Алматы: Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, 2021. – 107 с.
7. Достияров А.М., Умышев Д.Р., Яманбекова А.К., Колдасова Г.А. Сутегі қосылған қоқыс газының құйынды оттықта жану процесін зерттеу // Вестник Алматинского университета энергетики и связи, 2025, №1, С. 27-40.

УДК 661.961.6, 661.66

СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИСТИКА УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В НИЗКОУГЛЕРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Скаков М.К.¹, Миниязов А.Ж.^{2,3}, Градобоев А.В.⁴, Агатанова А.А.^{2,3*},
Туленберген Т.Р.^{2,3}

¹Национальный ядерный центр Республики Казахстан, г. Курчатов, Казахстан

²Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, г. Курчатов, Казахстан

³Университет Шакарима, г. Семей, Казахстан

⁴Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

*e-mail: agatanova@nnc.kz

1 Введение

В современном энергетическом секторе водород является ключевым элементом в переходе к углеродно-нейтральной экономике [1]. Благодаря экологичности и универсальности применения он признан как стратегический

энергоноситель будущего. Казахстан активно внедряет национальную стратегию, направленную на развитие инновационных низкоуглеродных технологий и расширение производства водорода, что соответствует глобальным усилиям по борьбе с изменением климата и декарбонизации экономики [2].

Перспективным и экономичным методом получения водорода является пиролиз метана, при котором образуются ценные углеродные материалы. Такой подход позволяет значительно снизить производственные затраты и минимизировать экологические последствия по сравнению с традиционными технологиями [3–6]. В отличие от классических методов, пиролиз метана протекает без выброса углекислого газа, что делает его привлекательным для устойчивого развития. Образующийся твердый углерод может быть использован в качестве сырья для производства материалов с широким спектром применения – от катализаторов до материалов для хранения энергии.

Ранее проведенные нами исследования [7, 8] показали высокую эффективность метода пиролиза метана в микроволновом плазменном разряде. Такой подход открывает новые перспективы для разработки энергоэффективных и экологически безопасных технологий, которые могут стать важной частью национальной стратегии устойчивого развития Казахстана и внести вклад в глобальные усилия по снижению углеродного следа.

Целью настоящей работы является исследование характеристик углеродных материалов, синтезированных при пиролизе метана в СВЧ-разряде, с учетом их потенциального применения в энергетике.

2 Методы исследования и оборудование

В рамках настоящей работы исследовались синтезируемые углеродные материалы, образующиеся при пиролизе метана в условиях микроволнового плазменного разряда. В качестве экспериментальной базы использовалась установка для прикладных исследований ПМ-6, разработанная в Центре технологических компетенций в сфере водородной энергетики филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК [9]. Процесс проводился при трех различных значениях мощности магнетрона: 0,6 кВт, 1,0 кВт и 1,4 кВт, с использованием метана в качестве рабочего газа и аргона как инертной плазмообразующей среды.



Рис. 1 – Установка для прикладных исследований ПМ-6 [10]

Для комплексной характеристики углеродных материалов в данной работе исследовались морфологические особенности и поверхностная структура с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) позволила охарактеризовать наноструктуру частиц. Оценка степени кристалличности и идентификацию фаз, проводилась с использованием рентгеновской дифракции. Текстурные характеристики, такие как удельная поверхность, пористость и распределение пор по размерам, были определены на основе адсорбционных методов БЭТ и БДХ.

3 Результаты

СЭМ анализ показал, что морфологические и структурные свойства углеродных материалов, синтезированных методом микроволнового пиролиза метана, зависят от мощности разряда. Установлен переход от рыхлой, пористой структуры при 0,6 кВт к более упорядоченной и плотной при 1,4 кВт.

Рентгенофазовый анализ (РФА) подтвердил изменение степени кристалличности. Образец, полученный при мощности 0,6 кВт характеризуется аморфной структурой с признаками турбостратности. С увеличением мощности магнетрона у образцов присутствуют признаки графитизации.

Проведённый ПЭМ-анализ углеродных образцов позволил установить особенности их морфологии и микроструктуры. Все образцы обладают пористой структурой с признаками слоистости, типичной для графеноподобных и турбостратных углеродных материалов. Образец, полученный при минимальной мощности 0,6 кВт характеризуется рыхлой аморфной структурой с выраженной пористостью. С увеличением мощности в образцах обнаружены области локальной упорядоченности и графеноподобные фрагменты, включая сферические образования с турбостратной структурой.

По результатам БЭТ и БДХ анализа, наибольшая удельная площадь поверхности ($628 \text{ м}^2/\text{г}$) и пористость ($5,04 \text{ см}^3/\text{г}$) зафиксированы при минимальной мощности 0,6 кВт. С повышением мощности структура уплотняется, а параметры текстуры снижаются. Эти данные подчеркивают возможность управления морфологией и свойствами углерода путем регулирования мощности микроволнового разряда, что актуально для создания высокоэффективных сорбентов и каталитических систем на базе возобновляемых углеродных материалов.

4 Заключение

Проведенные исследования продемонстрировали, что параметры микроволнового плазменного разряда, в частности мощность магнетрона, оказывают существенное влияние на морфологические и структурные характеристики углеродных материалов. При мощности 0,6 кВт наблюдалось формирование рыхлой, губчатой структуры с высокой удельной поверхностью и развитой мезопористостью. С увеличением мощности до 1,4 кВт наблюдается укрупнение частиц, снижение пористости и образование более упорядоченных, турбостратических структур.

Полученные результаты подтверждают возможность управления морфологией углерода за счет настройки параметров микроволнового разряда. Это открывает новые перспективы для создания высокоэффективных систем производства водорода и углерода. Они являются экономически обоснованными и экологически безопасными.

5 Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR21882200 «Разработка и исследование инновационных технологий, материалов и устройств для производства, хранения водорода и генерации электроэнергии»).

Список литературы

1. Global Hydrogen Review IEA. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>, (дата обращения 11.08.2025).
2. Strategy for achieving carbon neutrality of the Republic of Kazakhstan until 2060. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121> (дата обращения 10.01.2025).
3. J.R. Fincke, R.P. Anderson, T. Hyde, B.A. Detering, R. Wright, R.L. Bewley, D.C. Haggard, W.D. Swank, Plasma thermal conversion of methane to acetylene, J. Plasma Chem. Plasma Process., 22 (2002), pp. 107-138, 10.1023/A:1012944615974
4. N. Sánchez-Bastardo, R. Schlögl, H. Ruland, Methane pyrolysis for zero-emission hydrogen production: a potential bridge, J. Ind. Eng. Chem. Res., 60 (2021), pp. 11855-11881, 10.1021/acs.iecr.1c01679
5. N. Sánchez-Bastardo, R. Schlögl, H. Ruland, Response to comment on “methane pyrolysis for zero-emission hydrogen production: a potential bridge technology from fossil fuels to a renewable and sustainable hydrogen economy”, J. Ind. Eng. Chem. Res., 60 (2021), pp. 17795-17796, 10.1021/acs.iecr.1c04435
6. S. Cheon, M. Byun, D. Lim, H. Lee, H. Lim, Parametric study for thermal and catalytic methane pyrolysis for hydrogen production: techno-economic and scenario analysis, Energies, 14 (2021), p. 6102, 10.3390/en14196102
7. M. Skakov, A. Miniyazov, T. Tulenbergenov, I. Sokolov, G. Zhanbolatova, A. Kaiyrbekova, A. Agatanova. Hydrogen production by methane pyrolysis in the microwave discharge plasma [J]. AIMS Energy, 2024, 12(3): 548-560. doi: 10.3934/energy.2024026
8. A. Miniyazov, M. Skakov, T. Tulenbergenov, I. Sokolov, N. Mukhamedova, A. Agatanova, A. Sabyrtaeva, T. Akhmedi, Structural evolution of carbon from methane pyrolysis in microwave plasma, Carbon Trends, Volume 21, 2025, 100552, <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2025.100552>
9. Филиал «Институт атомной энергии» www.iae.kz
10. Патент на изобретение № 36605 РК. Устройство для получения водорода и твердого углерода на основе плазменного пиролиза метана в СВЧ-разряде. М.К. Скаков, А.Ж. Миниязов, В.В. Бакланов, Е.Т. Коянбаев, Т.Р. Туленбергенев, И.А. Соколов, Ф.Қ. Жанболатова, Е.С. Бейсенов; заявитель и патентообладатель РГП НЯЦ РК.— заявл. 25.08.2022 г.; опубл. 16.02.2024 г., Бюл. № 7.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ 12X18H10T И AISI 316 ТРУБОПРОВОДОВ АЭС

Акболатов Е.Ж.^{1,2}, Скаков М.К.³

¹ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, г. Курчатов, Казахстан

² Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

³ РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», г. Курчатов, Казахстан

e-mail: akhbolatov@nnc.kz

Введение

Как известно, надёжность и безопасность эксплуатации ядерно-энергетических установок во многом определяются качеством применяемых конструкционных материалов и их сварных соединений. В условиях высоких температур, давления, воздействия облучения и агрессивных сред особую значимость приобретают коррозионностойкие аустенитные стали, обладающие сочетанием высокой термической и химической стойкости. Благодаря этим свойствам они широко применяются в элементах активной зоны, теплообменниках, трубопроводах, насосах и герметичных оболочках ядерных установок, где от работоспособности сварных соединений напрямую зависит общая эксплуатационная надёжность оборудования, в целом.

Наиболее распространёнными в странах СНГ являются стабилизированные титаном и бором стали типа 18-10 (12X18H10T, 08X18H10T, 08X18H12B), тогда как за рубежом предпочтение отдают нестабилизированным маркам AISI 316 и 316L. Среди отечественных материалов перспективной является сталь 12X18H10T, обладающая хорошей термостойкостью. В сочетании с широко используемой в мировой практике коррозионностойкой сталью AISI 316 она представляет интерес для создания надёжных сварных конструкций, где требуется сочетание термостойкости (от 12X18H10T) и высокой коррозионной стойкости (от AISI 316). Однако систематические исследования сварки сталей 12X18H10T и AISI 316 практически отсутствуют, что связано с различиями в стандартизации (ГОСТ и AISI/ASTM) и традиционной ориентацией исследований на однородные соединения. В мировой литературе имеются данные о сварных соединениях аустенитных сталей AISI 304, 316, 321 и их комбинаций. Однако, остаётся ряд нерешённых проблем: склонность к межкристаллитной коррозии (МКК) в зоне термического влияния (ЗТВ) вследствие выделения карбидов хрома [1, 2, 3]; сложность выбора присадочного материала (проволоки AISI 308L и 316L снижают прочность и твёрдость, а INCONEL-625 обеспечивает высокие характеристики, но экономически

невыгоден) [4–6]; формирование δ -феррита, влияющего на коррозионную стойкость и механические свойства [2, 7]. В ряде случаев разрушение образцов фиксируется по сварному шву, что подтверждает необходимость оптимизации режимов сварки [8].

Таким образом, несмотря на наличие некоторых исследований по разнородным соединениям зарубежных марок сталей, вопрос сварки стабилизированных сталей (например, 12X18H10T) с нестабилизированными (AISI 316) остаётся практически не изученным.

В связи с вышеизложенным, целью данной работы является исследование структурно-фазового состояния зон сварного соединения разнородных сталей 12X18H10T и AISI 316 а и оценка склонности к МКК.

Материалы и методы исследования

Для выполнения сварки использовались трубы из нержавеющей сталей 12X18H10T и AISI 316 диаметром 42 мм, толщиной стенки 3,5 мм и метод импульсной аргонодуговой сварки. Сварка проводилась в среде аргона. Кромки труб подготавливали по V-образной схеме с углом разделки 70° (рисунок 1). В качестве присадочного материала нами был выбран ER316L производства Böhler диаметром 1,6 мм. Химический состав основного и присадочного металлов приведён в таблице 1. Квалификация сварного шва осуществлялась с применением визуально-измерительного контроля и радиографического исследования. Параметры режима сварки приведены в таблице 2.

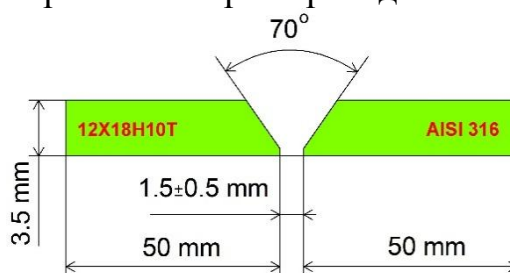


Рис. 1. - V-образная разделка кромок

Таблица 1. Химический состав основного и присадочного металла (%).

Металл	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	P	S
12X18H10T	≤0.12	≤0.8	≤2.0	17.0–19.0	9.0–11.0	–	0.4–0.7	≤0.035	≤0.025
AISI 316	≤0.08	≤0.75	≤2.0	16.0–18.0	10.0–14.0	2.0–3.0	–	≤0.045	≤0.03
ER316L	≤0.03	0.3–0.65	1.0–2.5	18.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	–	≤0.03	≤0.02

Таблица 2. Параметры режима сварки.

Рабочий ток, А	Базовый ток, А	Частота импульсов, Гц	Напряжение сварки, В	Скорость сварки, мм/с	Расход аргона, л/мин	
					В горелку	На поддув
90	45	1	13-14	0,30 ~ 0,60	8 ~ 10	4 ~ 5

экспериментальную оценку содержания ферритной фазы в металле шва выполняли магнитным методом в соответствии с ГОСТ Р 53686-2009 [9]. Измерения проводили с использованием ферритометра Ferritscope FMP30 с преобразователем FGAB1.3-Fe. Контроль осуществлялся в четырёх точках, равномерно распределённых по длине кольцевого шва (рисунок 2). В каждой точке регистрировали среднее значение на основе пяти последовательных замеров.

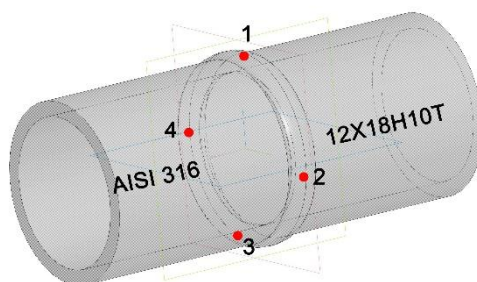


Рис. 2. - Схема измерения содержания ферритной фазы в металле шва

Для оценки склонности к МКК использовали стандарт ГОСТ 6032-2017, метод АМУ [10]. Из разнородного сварного соединения был вырезан образец шириной 10 мм, который погружали в кипящий водный раствор сульфата меди и серной кислоты с добавлением металлической меди в виде стружки. Испытание проводили в течение 8 часов. После завершения испытания образец исследовали на наличие признаков МКК с использованием сканирующего электронного микроскопа TM4000Plus Hitachi. Анализ выполнялся на протравленных шлифах при увеличении не менее 200×. Для более точной оценки степени сенсibilизации границ зёрен были подготовлены два шлифа: один из контрольного (неподвергнутого испытанию) образца, второй — из образца после коррозионных испытаний.

Результаты и обсуждения

В таблице 3 приведены результаты экспериментального определения содержания ферритной фазы в металле шва. Как видно из данных таблицы, использование присадочного металла ER316L позволило стабильно сформировать двухфазную аустенитно-ферритную микроструктуру с равномерным распределением ферритной составляющей. Среднее содержание ферритной фазы в металле шва составило 3,76 %, что соответствует требованиям для сварных соединений из коррозионностойких сталей.

Таблица 3. Результаты контроля содержания ферритной фазы в металле шва.

Номер участка по рис.2	1	2	3	4
Значение феррита (%)	3.33	3.36	4.63	3.72
Ср. значение	3,76 %			

Однако по результатам металлографического исследования были обнаружены коррозионные повреждения в зоне термического влияния (ЗТВ) со стороны стали AISI 316. В контрольном образце, не подвергавшемся испытанию на МКК, в структуре металла шва и основного металла 12X18H10T и AISI 316 видимых дефектов не обнаружено. При этом микроструктура металла шва более схожа на структуру основного металла 12X18H10T, которые имеют измельченную дендритную структуру (рис.3а). Четкая граница зоны сплавления была выявлена со стороны стали AISI 316. В этой же области были обнаружены коррозионные повреждения вдоль линии сплавления, что указывает на локальную склонность металла к МКК (рис. 3б).

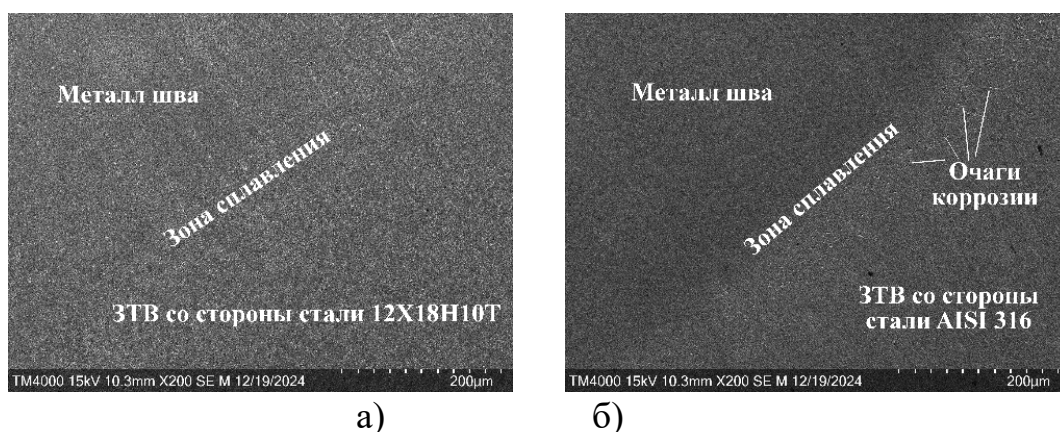


Рис. 3. - Зона металла шва и ЗТВ до испытания на МКК: а) со стороны 12X18H10T, б) со стороны AISI 316

В образце, подвергавшемся испытанию на МКК, структура металла шва и основного металла 12X18H10T также соответствует дендритной структуре, которая стала более выраженной. В ЗТВ дендриты ориентированы от основного металла 12X18H10T к поверхности металла шва, что связано с направлением теплоотвода (рис. 4). Дендриты, залегающие в ЗТВ со стороны стали 12X18H10T, имеют более развитое строение границ. Согласно работе [11], образовавшиеся при сварке дендриты могут состоять из δ -феррита. Как видно из рисунка 8, δ -феррит в металле шва и ЗТВ со стороны 12X18H10T имеет преимущественно скелетную и вермикулярную морфологию. Междендритное пространство заполнено аустенитом.

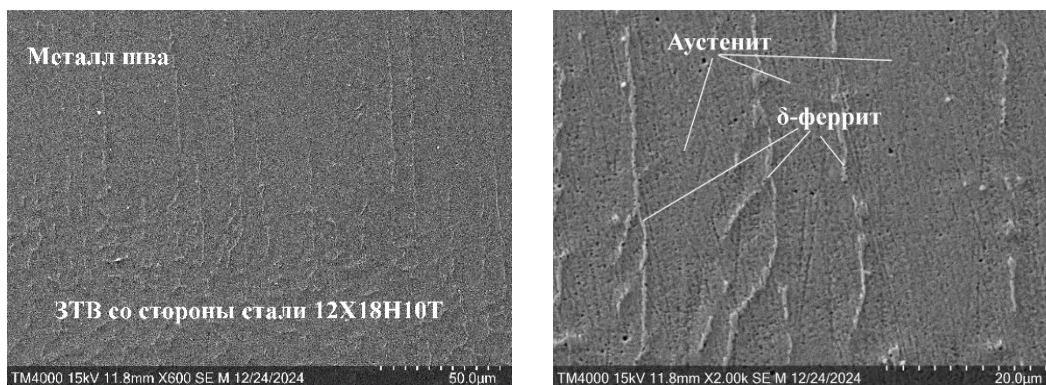


Рис. 4. - Структура металла шва и ЗТВ после испытания МКК со стороны стали 12X18H10T

Однако коррозионные повреждения, обнаруженные в зоне сплавления со стороны основного металла AISI 316, стали более выраженными и увеличились в размерах, также выявлены неметаллические включения (рис. 5). Деградация металла в этой области весьма интенсивна. Микроструктура в этой зоне представляет собой аустенит с большим количеством карбидов. Основная концентрация карбидов наблюдается преимущественно по границам зерен. Это указывает на то, что сталь AISI 316 более склонна к МКК по сравнению со сталью 12X18H10T.

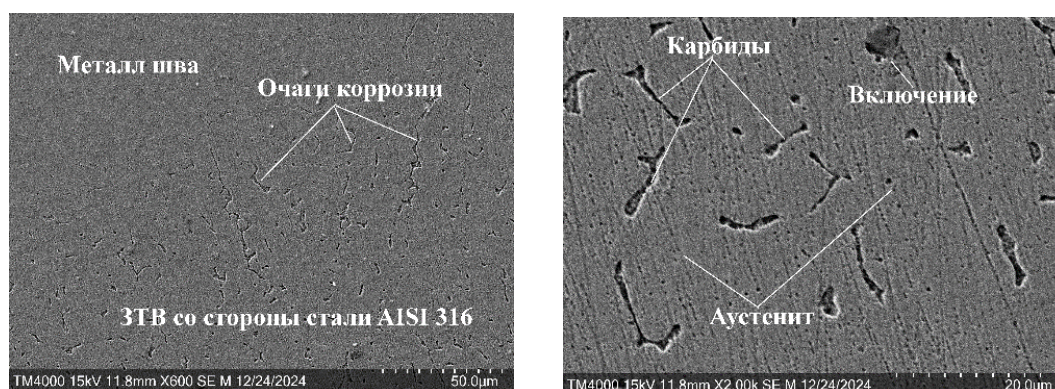


Рис. 5. - Структура металла шва и ЗТВ после испытания МКК со стороны стали AISI 316

Заключение

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Проведенные исследования показали, что использование присадочной проволоки ER316L обеспечивает формирование двухфазной аустенитно-ферритной структуры при сварке разнородных нержавеющей сталей 12X18H10T и AISI 316 с содержанием ферритной фазы в пределах 3,76 %;
2. Испытания на МКК показали, что металл шва и ЗТВ со стороны стали 12X18H10T обладают высокой стойкостью к МКК, что обусловлено наличием δ -феррита, обеспечивающего перераспределение хрома и снижающего склонность к локальному обеднению хромом вблизи границ зерен;
3. В зоне сплавления со стороны стали AISI 316 были выявлены выраженные коррозионные повреждения, которые увеличились после испытаний на МКК. Это связано, по – видимому, с образованием карбидов хрома вдоль границ зерен;
4. Для повышения коррозионной стойкости сварного соединения разнородных аустенитных сталей 12X18H10T и AISI 316 необходимо дальнейшие исследования по термообработке и определению механических характеристик.

Список литературы

1. Dan Hua, Shulin Lib and Sheng Luc. Effects of TIG Process on Corrosion Resistance of 321 Stainless Steel Welding Joint // Materials Science Forum Vol 749 (2013) pp 173-179
2. Ma, C., Peng, Q., Mei, J., En-Houhan, Ke, W.: Microstructure and corrosion behavior of the heat affected zone of a stainless steel 308L-316L weld joint. J. Mater. Sci. Technol. (2017)
3. Patil, T.B., Manikandan, S.G.K., Mangulkar, Y.E., Gade, P.L. Microstructural and Mechanical Behavior Studies of Dissimilar Weld on TIG Welding (2020) Advances in Intelligent Systems and Computing, 1025, pp. 901-909.
4. M. Pascual, F. Salas, F. J. Carcel, M. Perales y A. Sánchez. TIG AISI-316 welds using an inert gas welding chamber and different filler metals: Changes in mechanical properties and microstructure // REVISTA DE METALURGIA, 46 (6)., NOVIEMBRE-DICIEMBRE, 493-498, 2010
5. J. Lee, C. Jang, J.S. Kim and T.E. Jin. *Transactions*, SMiRT 19, 2007, Paper G04/4.
6. H. Naffakh, E.M. Shamanian and F. Ashrafizadeh, *J. Mater. Sci.* 43 (2008) 5.300-5.304.
7. Mohammad Soltani, H., Tayebi, M. Comparative study of AISI 304L to AISI 316L stainless steels joints by TIG and Nd:YAG laser welding (2018) Journal of Alloys and Compounds, 767, pp. 112-121.
8. A. Ramakrishnan, T. Ramesh Kumar, V. D. Tamilarasan. Experimental Investigation on Mechanical Properties of TIG Welded Dissimilar AISI 304L and AISI 316L Stainless Steel // International Conference on Advances in Materials Research., ICAMR 2019: Advances in Materials Research pp 801–807
9. ГОСТ Р 53686-2009 «Сварка. Определение содержания ферритной фазы в металле сварного шва аустенитных и двухфазных феррито-аустенитных хромоникелевых коррозионно-стойких сталей». // Юридическая фирма "Интернет и Право" URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/50418/>
10. ГОСТ 6032-2017 «Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытаний на стойкость против межкристаллитной коррозии». // Юридическая фирма "Интернет и Право" URL: <https://www.internet-law.ru/gosts/gost/65201/>
11. Chen X., Li J., Cheng X., He B., Wang H., Huang Z. Microstructure and mechanical properties of the austenitic stainless steel 316L fabricated by gas metal arc additive manufacturing. Materials Science and Engineering: A. 2017;703:567-577.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДЫ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ТВЭЛОВ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

Анохин Е.М.

НАО «Шәкәрім университет» г. Семей, Республика Казахстан.

1. Введение

Атомные электростанции являются сложными энергетическими системами, в основе работы которых лежит управляемое преобразование энергии деления ядер в тепловую [3, с. 6]. Ключевым элементом этого процесса является отвод огромного количества тепла от тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) реактора. Эту задачу выполняет теплоноситель, циркулирующий в первом контуре станции. В качестве теплоносителей могут использоваться различные вещества: вода, жидкие металлы, органические жидкости, газы. Однако наиболее широкое распространение, особенно в реакторах типа ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор), получила вода благодаря своим уникальным свойствам и экономической доступности [4, с. 172].

Цель данного доклада – систематизировать и проанализировать основные аспекты использования воды в качестве теплоносителя для охлаждения ТВЭЛов, основываясь на фундаментальных принципах гидродинамики и теплообмена в ядерных реакторах.

2. Основные свойства и типы водяных теплоносителей

Выбор воды в качестве теплоносителя обусловлен совокупностью её физических и ядерно-физических свойств. Во-первых, вода обладает высокой теплоёмкостью, что позволяет эффективно аккумулировать и переносить тепло. Во-вторых, она является хорошим замедлителем нейтронов, что особенно важно для реакторов на тепловых нейтронах, где вода выполняет двойную функцию – и теплоносителя, и замедлителя [4, с. 69].

В ядерной энергетике применяются два изотопных вида воды:

Лёгкая вода (H_2O) – обычная вода, наиболее распространённый и дешёвый теплоноситель. Её основной недостаток – относительно высокое сечение поглощения тепловых нейтронов, что требует использования обогащённого урана в качестве топлива.

Тяжёлая вода (D_2O) – вода, в которой атомы водорода заменены на его тяжёлый изотоп, дейтерий. Она характеризуется значительно меньшим поглощением нейтронов, что позволяет использовать в качестве топлива природный, необогащённый уран. Однако её промышленное производство является весьма трудоёмким и дорогостоящим процессом. Методы, такие как низкотемпературная ректификация водорода или сероводородный процесс,

требуют значительных капитальных и энергетических затрат, что определяет высокую стоимость конечного продукта [2, с. 79; 1, с. 101].

Сравнительные характеристики обычной и тяжёлой воды, важные для их использования в ядерной энергетике, представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Сравнение свойств лёгкой и тяжёлой воды [2, с. 79]

Свойство	D ₂ O	H ₂ O
Молекулярная масса, а.е.м.	20,02942	18,01600
Нормальная температура кипения, К	374,59	373,16
Плотность, г/мл (при 298,16 К)	1,10449	0,99707
Удельная теплоёмкость, кДж/(кг·К)	4,201	4,184
Замедляющая способность	Высокая	Умеренная
Поглощение нейтронов	Очень низкое	Относительно высокое

3. Процессы теплообмена и гидродинамики в активной зоне

Отвод тепла от ТВЭЛов осуществляется в процессе сложного конвективного теплообмена. Поток теплоносителя, омывая поверхность ТВЭЛ, образует пограничный слой, в котором и происходит основной перенос тепла [3, с. 7]. Процесс теплоотдачи описывается уравнением Ньютона-Рихмана, а эффективность переноса тепла характеризуется коэффициентом теплоотдачи.

В реакторах типа ВВЭР вода в первом контуре находится под высоким давлением (порядка 16 МПа), что предотвращает её кипение. Теплообмен происходит в однофазной среде при вынужденном течении жидкости [5, с. 294]. Распределение температуры в ТВЭЛ, его оболочке и в потоке теплоносителя является ключевым фактором, определяющим надёжность и безопасность работы реактора. Расчёт этих температурных полей является одной из важнейших задач при проектировании активной зоны [3, Глава 4].

Необходимо учитывать, что при определённых условиях, особенно при аварийных ситуациях со снижением давления или расхода теплоносителя, возможно возникновение поверхностного кипения. Это явление, известное как «кризис теплоотдачи», приводит к резкому ухудшению теплообмена и может стать причиной перегрева и разрушения оболочки ТВЭЛа [3, с. 86-88].

4. Проблемы, связанные с использованием водяного теплоносителя

Несмотря на свои преимущества, использование воды сопряжено с рядом серьёзных технологических проблем.

Коррозия конструкционных материалов. Вода, особенно при высоких температурах и в поле ионизирующих излучений, является агрессивной средой.

Она вызывает коррозию сталей и сплавов, из которых изготовлены элементы первого контура (трубопроводы, корпус реактора, парогенераторы) [5, с. 17]. Продукты коррозии (в основном оксиды железа) переносятся потоком теплоносителя и могут образовывать отложения на поверхности ТВЭЛов. Эти отложения ухудшают теплопередачу и могут привести к локальному перегреву.

Радиолиз воды. Под действием интенсивного нейтронного и гамма-излучения в активной зоне происходит разложение молекул воды (радиолиз) с образованием водорода и кислорода ($2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$). Образующийся кислород значительно усиливает коррозионные процессы. Для подавления радиолиза в теплоноситель первого контура дозируют водород или аммиак, поддерживая восстановительную среду [5, с. 12, 284].

Требования к водно-химическому режиму (ВХР). Для минимизации коррозии и образования отложений необходимо поддерживать очень высокое качество воды и строго контролировать её химический состав (рН, содержание кислорода, примесей). Организация и поддержание ВХР является одной из важнейших задач при эксплуатации АЭС [5, с. 9].

Заключение

Вода является наиболее распространённым и изученным теплоносителем в мировой ядерной энергетике. Её уникальные теплофизические свойства, а также функция замедлителя, делают её практически незаменимой для реакторов на тепловых нейтронах, таких как ВВЭР.

Эффективное и безопасное использование воды требует глубокого понимания процессов гидродинамики и теплообмена в активной зоне реактора. Ключевыми задачами при проектировании и эксплуатации являются обеспечение надёжного отвода тепла от ТВЭЛов, предотвращение кризиса теплоотдачи и управление сложными физико-химическими процессами, в первую очередь, коррозией и радиолизом. Дальнейшее совершенствование конструкций реакторов и оптимизация водно-химических режимов остаются приоритетными направлениями для повышения надёжности и экономической эффективности атомной энергетики

Список использованной литературы

1. Атомная энергия / Акад. наук СССР, Гл. упр. по использованию атомной энергии при Совете Министров СССР. — М.: Гос. изд. техн.-теорет. лит., 1956 — Том 7, вып. 2. — 1959. — С. 97—200. / URL: https://elbib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t7-2_1959/p101
2. Ковалюк Е.Н., Шишкина О.А., Маркина А.С. Получение и применение тяжелой воды // Вестник ИргТУ. — 2014. — №1 (84). — С. 77-80. / URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_38250605_21881387.pdf
3. Коротких А.Г., Шаманин И.В. Основы гидродинамики и теплообмена в ядерных реакторах: Учебное пособие. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. — 117 с. / URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KOROTKIKH/eng/Teaching/Tab/Korotkikh.pdf>

4. Саркисов А.А., Гусев Л.Б., Калинин Р.И. Основы теории и эксплуатации судовых ядерных реакторов. – М.: Наука, 2008. – 397 с. / URL: https://elib.biblioatom.ru/text/sarkisov_inzhenernye-osnovy-sudovyh-yadernyh-reaktorov_2011/p3

5. Петрова Т.И., Воронов В.Н., Дяченко Ф.В. Физико-химические процессы в водном теплоносителе электростанций: учебник. – М.: Издательство МЭИ, 2021. – 384 с. / URL: <https://mpei.ru/Structure/Universe/tanpe/structure/tfhe/Documents/Физико-химические%20процессы%20в%20водном%20теплоносителе%20электростанций.pdf>

УДК 536.421.1; 622.245.5 (088.8)

СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН ТЭС И АЭС

Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю.*, Хисмет Е.

Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы, Казахстан

*e-mail: d.bondartsev@aes.kz

1 Введение

Повышение начальных параметров паровых турбин является наиболее эффективным способом получения более высоких показателей КПД [1] и энергоэффективности современных блоков, поэтому на сегодняшний день ведется активная работа по внедрению энергоблоков с параметрами пара выше сверхкритических [2]. Основной проблемой таких блоков является охлаждение диафрагмы [3] регулирующей ступени (см. рис. 1), которая подвергается значительным тепло-гидравлическим ударам [4] (термомеханическим напряжениям).

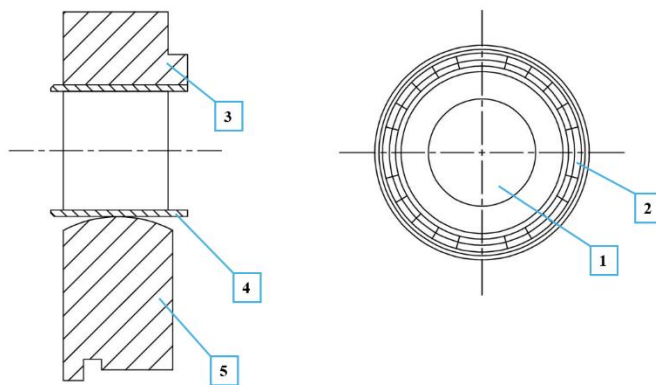


Рис. 1. - Модель диафрагмы: 1 - вал, 2 - сопловые лопатки, 3 - обод диафрагмы, 4 - бандажная лента, 5 - тело диафрагмы

В современных тепловых энергетических установках для решения данной проблемы используются капиллярно-пористые материалы. Подробно свойства и модель капиллярно-пористой структуры системы охлаждения описаны в источнике [5], что эффективнее, чем в работах [6, 7].

История и проблемы создания охлаждаемых паровых турбин поэтапно расписаны в [8, 9]. Система охлаждения в данной работе рассмотрена на примере энергоблока СКР-100 (Р-100-300) [10], работающего на параметрах пара выше сверхкритических. Данную турбину решено было делать двухцилиндровой: цилиндр сверхвысокого давления (ЦСВД) и совмещённый цилиндр высокого и среднего давления (ЦВСД). Все проблемы, связанные с необычно высокими начальными параметрами, локализовались в первом из них. Его основной вариант предусматривал охлаждение ротора и внутреннего корпуса.

Поскольку мировое паротурбостроение не имело опыта создания и эксплуатации охлаждаемых турбин, параллельно с охлаждаемым был разработан и изготовлен резервный неохлаждаемый вариант, получивший название «аустенитный», в котором ротор и внутренний корпус были выполнены из высокожаропрочных материалов, но его использование не потребовалось. Второй цилиндр, в котором размещались ступени до и после промперегрева, где температура пара была в освоенных ранее пределах, в основном повторял конструктивные решения, использованные заводом ранее. Уже на ранних стадиях проектирования обратила на себя внимание особенность свойств водяного пара сверхкритического давления, заключающаяся в том, что при его дросселировании (снижении давления без превращения тепловой энергии в кинетическую) температура пара существенно уменьшается. В соответствии с предварительными оценками суммарного теплового потока от рабочего к охлаждающему пару необходимое и достаточное количество последнего оказывалось чрезвычайно малым. При столь малом расходе охлаждающего пара предвиделись трудности с дозировкой его пропуска через каналы охлаждения, особенно при параллельном подводе охлаждающего пара к каждой ступени, что является обычным в газовых турбинах. Поэтому на дальнейших стадиях разработки системы охлаждения предпочтение было отдано варианту с последовательным пропуском охлаждающего пара через все охлаждаемые ступени.

Для охлаждаемого ЦСВД турбины СКР-100 была принята проточная часть со ступенями, имеющими на среднем диаметре степень реактивности близкую к 50% и ограничивающими разброс расходов на каждом из участков системы охлаждения пятью процентами. По четырём радиально расположенным паровпускным патрубкам рабочий пар поступал в четыре сопловые коробки, а из них – на рабочие лопатки активного типа, расположенные на диске увеличенного по сравнению с последующими ступенями диаметра. Это позволяло сработать на ступени значительный теплоперепад, уменьшить температуру пара за нею, перепад давлений на внутреннем корпусе и утечку через переднее концевое уплотнение. Рабочий пар из первой ступени во вторую поступал по промежуточному коническому кольцевому направляющему аппарату, разделявшему камеру после первой ступени на две части, которые условно

можно назвать камерой ротора и камерой внутреннего корпуса, поскольку из первой охлаждающий пар поступал в каналы охлаждения рабочих лопаток, а из второй – в каналы охлаждения направляющих лопаток.

Обе камеры для выравнивания давлений в них были соединены между собой через обтекаемые радиальные полые стойки промежуточного направляющего аппарата. Охлаждающий пар в каждую из этих камер подавался вдоль двух противоположных паровпускных патрубков свежего пара через промежуток между патрубком и его так называемым лирообразным компенсатором. Была предусмотрена бóльшая подача охлаждающего пара в камеру ротора, чем в камеру внутреннего корпуса, поскольку из первой он шёл и на переднее концевое уплотнение, а также подрегулировка любого из этих потоков.

При заданной температуре свежего пара 650 °С и принятой температуре охлаждающего пара 520 °С, чтобы уменьшить температурную разность на стенках патрубков, которая могла бы стать причиной их повреждения, и тепловой поток через эти стенки, их следовало теплоизолировать. Однако, никакой из известных минеральных изоляционных материалов непригоден для работы в паровой среде. Поэтому была использована экранная (или многоэкранная) изоляция, в которой роль изолятора играл малоподвижный слой среды, отделённый от основного потока тонким листом металла.

2 Материалы и методы исследования

Для визуализации процессов тепломассопереноса в пористой системе охлаждения методом фотографирования, скоростной киносъёмки и голографической интерферометрии теплообменная система выполняется из алундовой трубы с наружным диаметром 21×10^{-3} м. Применительно к энергоустановкам используются одно-, двух- и трехслойные сетки с ячейками: 0.4, 0.14×0.4, 0.08×0.14×0.4. Тепловым источником служит галоидная кварцевая лампа типа КГ 220-1000-3 (см. рис. 2), расположенная внутри трубы. Основные параметры лампы: напряжение – 220 В; мощность – 1000 Вт; световой поток – 26000 лм; светоотдача – 26 лм/Вт; полная длина – 180×10^{-3} м. Свет от лампы просвечивает стенку алундовой трубы. Яркость свечения стенки достаточная для фотографирования и скоростной киносъёмки на пленке чувствительностью 350...700 единиц ГОСТа. Тепловая нагрузка регулируется напряжением, подаваемым на электроды лампы через ЛАТР-9А, и замеряется ваттметром типа Д539 кл. 0.5.



Рис. 2. - Стенд для киносъёмки

Наблюдение проводится при следующих удельных тепловых потоках: 4×10^4 Вт/м²; 6.7×10^4 Вт/м²; 9.4×10^4 Вт/м² и 12×10^4 Вт/м², а также для промежуточных значений q . Исследуются критические нагрузки, фотографируются динамические режимы работы системы в экстремальных условиях, когда прекращается доступ жидкости до полного пересыхания структуры, а затем жидкость вновь подается в артерию. Для структуры вида 0.14×0.4 изучается подвод жидкости против действия гравитационных сил.

Съемка осуществляется после наступления стабильного теплового режима, что обычно занимает 5...7 минут. Расход охлаждающей жидкости принимается оптимальным. В некоторых случаях расход воды регулируется так, чтобы капли не было. Визуальные наблюдения процессов тепломассопереноса производятся методом скоростной киносъемки камерой СКС-1М (см. рис. 2). Фото и киносъемка также осуществляются с помощью фотоаппарата «Зенит» (см. рис. 3, а) и киноаппаратов «Красногорск» (см. рис. 3, б) и «Киев-16с» (см. рис. 3, в).

В качестве объективов используются: И-61Л (фокусное расстояние $f = 50 \times 10^{-3}$ м; светосила $d = 1:28$, 10-11 ($f = 135$, $d = 1:4$), Вега-7 ($f = 50$, $d = 1:2$) и РО ($f = 50$, $d = 1:2$).



Рис. 3. - Оборудование для фото и киносъемки

Для съемки применяется кино – и фотопленка типа А-2 шириной 16×10^{-3} м и номинальной чувствительностью 180...350 единиц ГОСТа. Время экспонирования составляет от 1/100 до 1/1000 секунды, диафрагма – от 2.8 до 16. В отдельных случаях устанавливается нейтральный 4-кратный фильтр, что позволяет при небольших скоростях киносъемки и срабатывания затвора фотоаппарата вести съемку с максимально открытой диафрагмой.

В качестве исходного параметра для набора частоты кадров и диафрагмы кино – и фото-съемочной аппаратуры служит средняя продолжительность «жизни» парового пузыря, которая в зависимости от величины q предполагается равной 1/50...1/4000 секунды. Фотографирование производится с расстояния 0.4...0.7 м.

Число действующих центров парообразования, отнесенное к единице поверхности нагрева, определяется по формуле:

$$\bar{n} = \left[\frac{\bar{M}}{F} \right] \times \frac{[\bar{\tau}_p + \bar{\tau}_o]}{\bar{\tau}_p},$$

Оценка надежности величины $\bar{M}$, под которой понимается математическое ожидание, производится с помощью доверительного интервала. Вероятность нахождения $\bar{M}$ внутри интервала принимается равной 0.95. Величины доверительного интервала для $\bar{M}$ не превышают $\pm 20\%$ от абсолютного значения $\bar{M}$.

Для определения отрывного диаметра пузыря производится покадровая обработка пленок. Записываются размеры всех лопнувших пузырей и вычисляются среднее значения. Доверительный интервал при надежности 0.95 не превышает $\pm 20\%$.

Частота отрыва вычисляется по формуле:

$$\bar{f} = \bar{\tau}^{-1} = \frac{K}{\Delta\tau \bar{n} F},$$

Определение скорости роста пузыря на поверхности нагрева осуществляется на экране «Микрофота», где измеряется диаметр отдельных пузырей через определенный интервал времени. За начало отсчета принимается момент времени, предшествующий появлению кадра с видимым паровым зародышем.

3 Результаты и обсуждения

Рассмотрим процесс зарождения пузыря на рисунке 4. Паровой пузырь 1 спонтанно возник во впадине 2 стенки 3, покрытой пористой структурой 4, за счет подвода удельного теплового потока q . В пористой [8] (или капиллярно – пористой [5]) структуре 4 протекает пароводяная смесь, подаваемая для разогрева корпуса и ротора машины, с расходом $G_{ж}$.

Подведенная энергия q затрачивается на рост парового зародыша 1, начиная с его наименьшего размера (см. рис. 5, стадия 2: 1 - критический радиус $R_{кр}$ парового пузыря). На рисунке 5 представлена динамика процесса зарождения, жизни и гибели одиночного пузыря в активной фазе (концентраторе напряжений) турбинной поверхности, покрытой пористой структурой. Структура может быть искусственной, организованной для охлаждения турбинных деталей, либо естественной (различные отложения, соли, налеты металлов и др.).

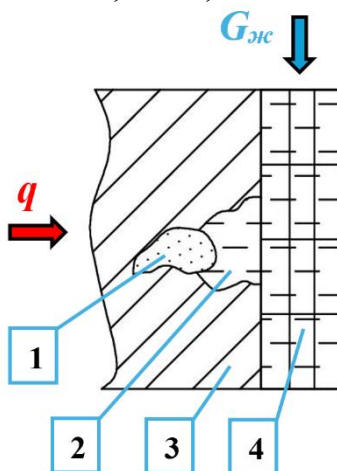


Рис. 4. - Начальная стадия зарождения парового пузыря

Паровой пузырь растет (рис. 5, стадия 1, 2) и касается внешней поверхности структуры (рис. 5, стадия 3, 4). Затем он достигает отрывного размера R_0 и разрушается (рис. 5, стадия 5, 6). За некоторым «молчанием» центра генерации спонтанно возникает новый паровой пузырь (рис. 5, стадия 7, 8) критического размера (рис. 5, стадия 9).

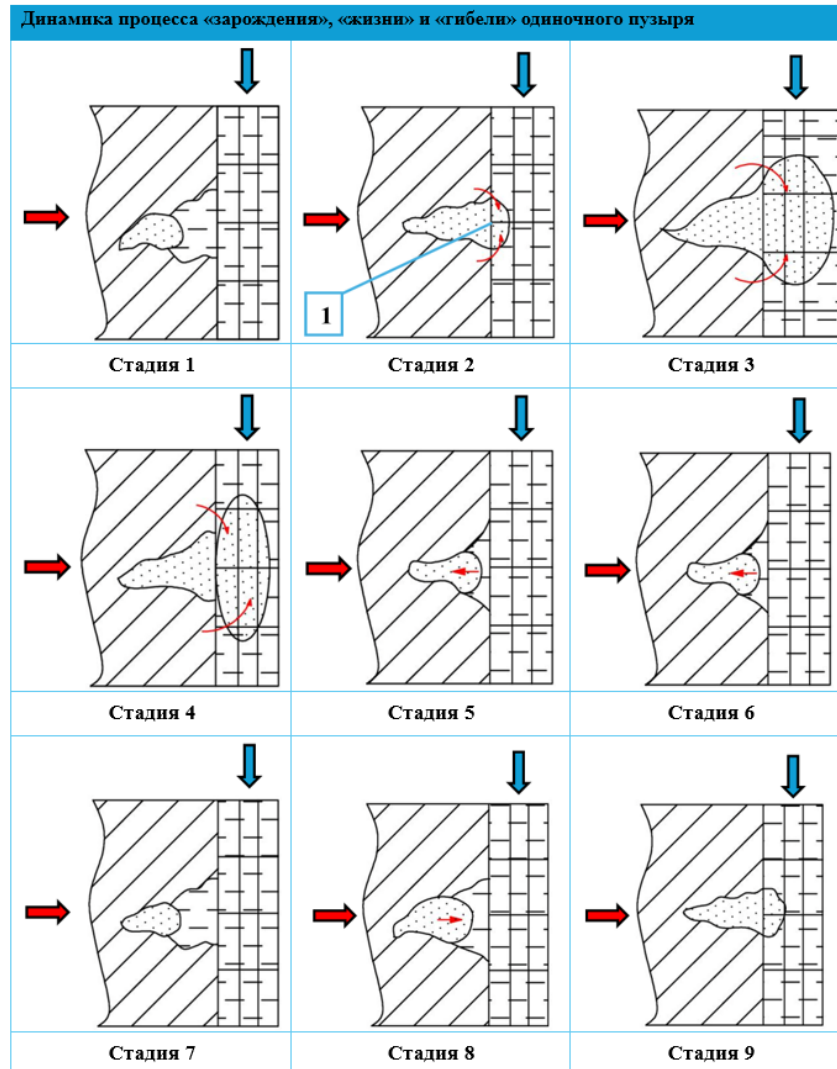


Рис. 5. - Иллюстрация процесса «зарождения», «жизни» и «гибели» одиночного пузыря активной поре

Когда граница пузыря касается уровня жидкости, в точке касания появляется отверстие, через которое пар вытекает из пузыря в паровой объем. По поверхности жидкости начнет распространяться волна. Такой процесс носит взрывной характер, как и в случае «рождения» парового зародыша ($\tau = 10^{-8} - 10^{-6}$ с). На рисунке 6 представлены кинограммы процессов тепло – и массопереноса: а) фитиль 0.14×0.4 ; б) фитиль 0.4 ; $q = 40 \div 120$ кВт/м²; в) и г) фитиль 0.4 в увеличенном виде; $q = 94$ кВт/м²; $\tilde{m} = \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{п}}} = 14$; $n = 0.14$.

В процессе пуска (останова) машины процессы «зарождения» и «гибели» пузыря приводят к возникновению кумулятивных явлений, которые наряду с коррозионными и электрическими процессами разрушают концентратор напряжения (активный центр генерации), доводя его размер до критической трещины.

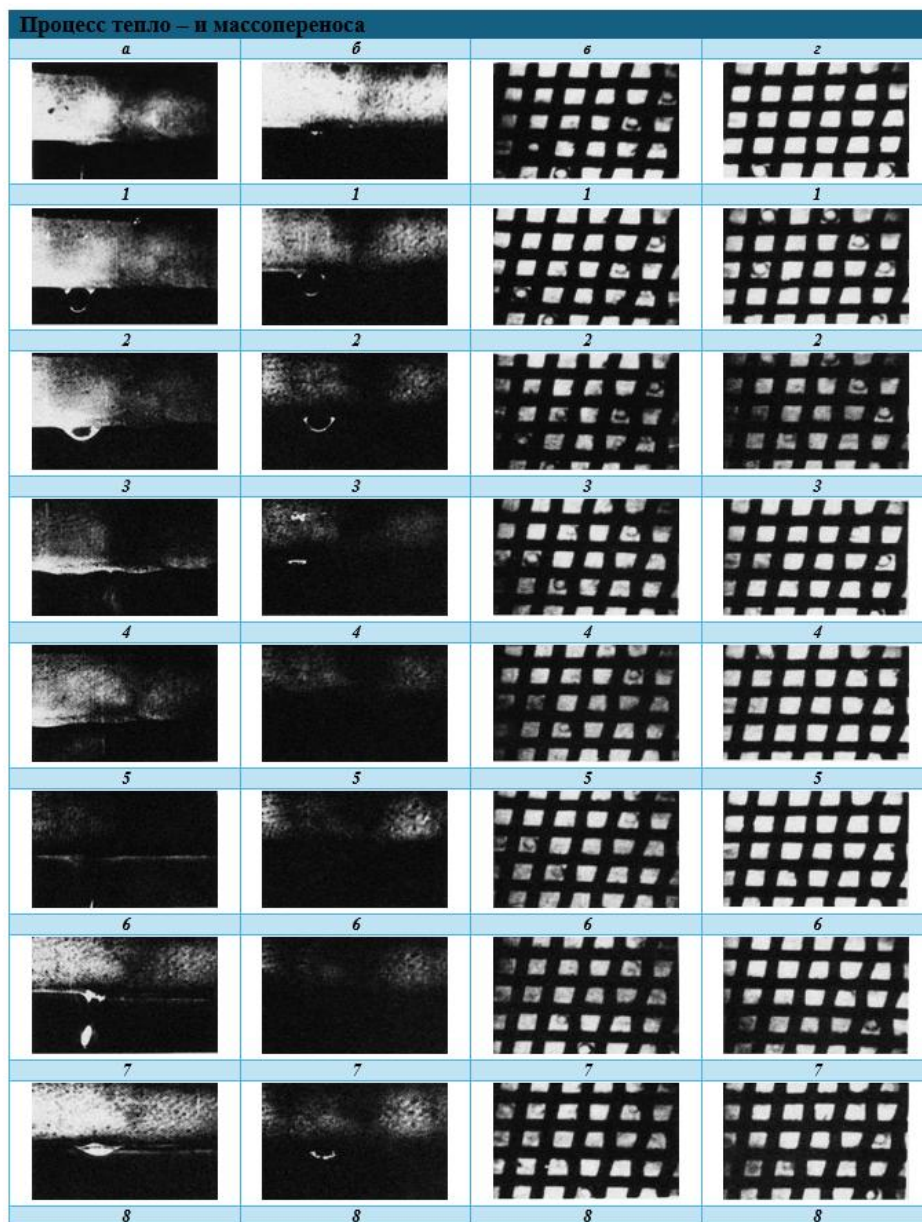


Рис. 6. - Кинограммы процессов тепло – и массопереноса.

Таким образом, процесс возникшей эрозии может сопровождаться ударом, кавитацией и электрохимической коррозией. В случае мгновенной концентрации пара в выемке (лунке), его объем мгновенно исчезнет и образуется мощный кумулятивный эффект (кавитация) см. рис 7.

На рис. 7 приводится явление выброса капель жидкости из капиллярно-пористой структуры вида 0.14×0.4 для тепловой нагрузки $q = 94 \times 10^3 \text{ Вт/м}^2$; избытка жидкости по отношению к расходу пара $\tilde{m} = \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{п}}} = 1.1$.

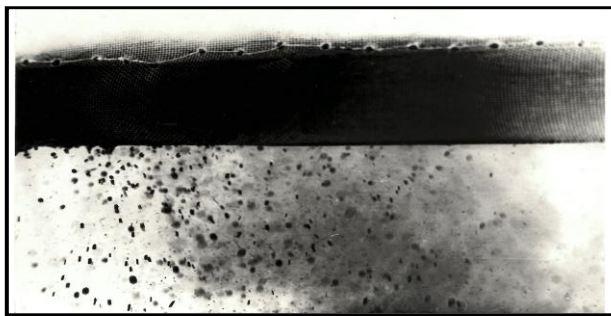


Рис. 7. - Явление выброса капель жидкости из паровой структуры

При этом ударные волны распространяются вглубь деталей машины, развиваются трещины (см. рис. 8), по которым поступает кислород. Развивающаяся трещина от совместного действия нескольких явлений (удара, кавитации и коррозии) приводит к эрозионным явлениям и разрушению элементов ротора и статора.



Рис. 8. - Каверна, образовавшаяся в покрытии

Чем больше глубина проникновения тепловой волны или размер разрушающихся частиц пористого покрытия [5], тем потребуется больше времени для разрушения деталей. По мере набора турбиной нагрузки она входит в номинальный (или переменный) режим работы, тепловые потоки на поверхности турбины стабилизируются (выравниваются) и приобретают среднеинтегральные расчетные величины.

Заключение

Разработаны установки для оптических методов исследования и показаны результаты обработки опытных данных в виде выброса капель жидкости, динамики развития паровой и жидкостной фаз для различных условий теплообмена (вид структуры, q , $\tilde{m} = \frac{m_{ж}}{m_{п}}$, τ , $\bar{\tau}_{жид}$, $\bar{n}$).

Предложено конструктивное решение по охлаждению сопловых лопаток первой ступени паровой турбины, работающей при нестандартных закритических параметрах. Рассмотрена модель диафрагмы для разработки системы охлаждения. Разработана замкнутая испарительно-конденсационная система охлаждения сопловых лопаток. Представлена капиллярно-пористая система охлаждения в полый части сопловых лопаток. Таким образом,

предложенная система может быть использована при проектировании новых конструкций турбин ТЭС и АЭС, работающих на параметрах выше сверхкритических (температура пара больше 570 °C). Приведенные исследования подтверждают целесообразность конструктивного решения, разработка и усовершенствование системы охлаждения выгоднее, чем подбор металла с более совершенными и дорогостоящими характеристиками.

Список литературы

1. Piwowarski M., Kosowski K., Richert M. Organic Supercritical Thermodynamic Cycles with Isothermal Turbine. *Energies* – 2023. – Vol. 16. – P. 4745. <https://doi.org/10.3390/en16124745>
2. Włodzimierz Wróblewski. Numerical evaluation of the blade cooling for the supercritical steam turbine. *Appl. Therm. Eng.* – 2013. – Vol. 51(1–2). – p. 953–962. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.10.048>
3. Qingye Li. Numerical and experimental analysis of the cavitation characteristics of orifice plates under high-pressure conditions based on a modified cavitation model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2023. – Vol. 203. – P. 123782. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123782>
4. Pengfei Hu. Non-equilibrium condensation flow characteristics of wet steam considering condensation shock effect in the steam turbine. *Appl. Therm. Eng.* – 2025. – Vol. 259. – P. 124828. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124828>
5. Genbach A.A., Bondartsev D.Yu., Genbach N.A., Genbach E.A. Experimental studies of natural material-based coatings for thermal protection of metallic surfaces. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*. – 2025. – Vol. 20. – P. 46. <https://doi.org/10.1186/s40712-025-00252-5>
6. Shoji Mori, Kunito Okuyama. Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling using honeycomb porous media. *International Journal of Multiphase Flow*. – 2009. – Vol. 35. – p. 946-951. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.05.003>
7. Riadh Boubaker, Vincent Platel. Dynamic model of capillary pumped loop with unsaturated porous wick for terrestrial application. *Energy*. – 2016. – Vol. 111. – p. 402-413. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.102>
8. Genbach A.A., Bondartsev D.Yu., Piralishvili Sh.A. Heat transfer capabilities of coatings made of mineral media. *Thermal processes in engineering*. – 2025. – Vol. 17. no. 7. – p. 333–343. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185843>
9. *Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants (Second Edition)*. Woodhead Publishing Series in Energy. – 2022. – p. 643-661. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824359-6.00030-5>
10. Arkadyev B.A. Features of steam turbine cooling by the example of an SKR-100 turbine for supercritical steam parameters. *Therm. Eng.* – 2015. – Vol. 62. – p. 728–734 (2015). <https://doi.org/10.1134/S004060151510002X>

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ УГЛЯ В НЕВЕНТИЛИРУЕМОЙ ШАРОВОЙ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Каримолданова М.А.¹, Әкімбек Г.Ә.², Алияров Б.К.¹

¹Алматинский университет энергетики и связи имени Г.Даукеева, г. Алматы, Казахстан

²Евразийский университет имени Л.Н.Гумилева, г.Астана, Казахстан

*e-mail: m.karimoldanova@aes.kz

1 Основной текст

Энергетика Казахстана традиционно базируется на угле, и этот ресурс остаётся основой производства электроэнергии. Обеспечение надёжной работы систем пылеприготовления на тепловых электростанциях является одной из ключевых задач, так как от их эффективности зависит энергетическая и экологическая безопасность. Современные пылеприготовительные установки отличаются высоким энергопотреблением и низким уровнем автоматизации, что определяет актуальность совершенствования их конструкции.[1]

Сегодня около 69% электроэнергии в Казахстане производится на угольных ТЭС. Установленная мощность электростанций составляет почти 24 тыс. МВт, из которых доступная мощность – около 19 тыс. МВт. [3]

В данной работе основное внимание уделено процессу измельчения угля в шаровых барабанных мельницах как ключевому этапу подготовки топлива для последующего пылевидного сжигания. Существует достаточно большое количество работ, в которых подробно рассматриваются процессы взаимодействия размольных тел с частицами измельчаемого материала. [2,3,4]

Одной из ключевых проблем шаровых мельниц является снижение эффективности измельчения угля в процессе эксплуатации, что ведёт к повышению энергозатрат и снижению качества получаемого топлива. Степень измельчения угля определяет дисперсный состав пылевидного топлива и оказывает прямое влияние на качество сгорания, энергетическую эффективность и экологические показатели работы котельных агрегатов.

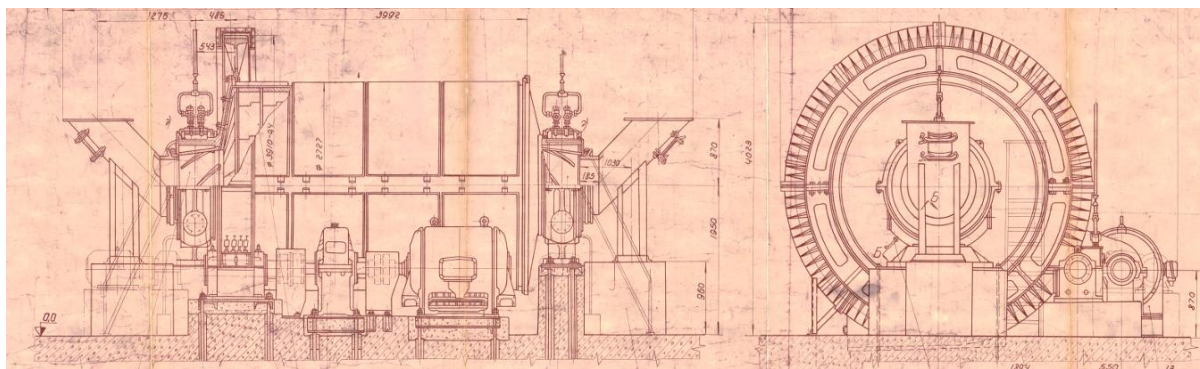


Рис.1. – ШБМ-10 [2]

На тепловых электростанциях основное применение получили вентилируемые шаровые барабанные мельницы (Рисунок 1), в которых горячий воздух подаётся непосредственно в барабан. Данный воздушный поток выполняет двойную функцию: обеспечивает сушку угля и транспортирует измельчённые частицы до требуемого фракционного состава. Количество подаваемого воздуха является определяющим параметром работы центробежного сепаратора, установленного на выходе мельницы. Сепаратор возвращает в барабан крупные фракции для повторного измельчения, а угольная пыль заданного качества направляется в систему топливоподачи котла.[4]

В результате анализа установлено, что применение **невентилируемой мельницы** обеспечивает более точный контроль гранулометрического состава и повышает эффективность измельчения угля.

В наиболее общем случае, система получения измельченного угля в невентилируемой шаровой барабанной мельнице может быть следующей. [1]

- измельчаемый уголь, после бункера дробленного угля, поступает в контактную сушилку

- после сушилки, уголь, с пониженным содержанием внешней влаги, поступает в невентилируемую мельницу через вход, размещенный по всей образующей в верхней части барабана

- производится измельчение поступившей партии угля до требуемого уровня – задается продолжительностью измельчения

- после измельчения с заданной продолжительностью угольные частицы через тот же вход (теперь выход) выгружаются из мельницы в бункер измельченного угля

- на выходе из барабана устанавливается классификатор размера мелющих шаров, который сохраняет в барабане мелющие шары только приемлемых размеров, шары малых размеров отделяются от измельченного угля в другом классификаторе.

Загрузку дробленного угля из бункера в мельницу и мелющих шаров можно производить через вход барабана (с протяженностью практически на всю длину барабана). Это обеспечивает приемлемую равномерность загрузки угля и шаров по всей протяженности барабана, что улучшает интенсивность измельчения и может снизить уровень грохота при измельчении.

Измельченный уголь выгружается из невентилируемой мельницы через тот же вход (протяженный), который при его повороте к входу в бункер - накопитель выполняет роль выхода. Кроме того, в невентилируемой мельнице при выгрузке измельченного угля в этом выходе можно установить с своеобразный классификатор шаров по размерам. Применение классификатора означает, что в невентилируемой мельнице используются только шары с размерами, обеспечивающими измельчение угля с максимальной интенсивностью.

При использовании комплекса с невентилируемой мельницей, как уже отмечалось, из системы удаляются:

- центробежный сепаратор,

- циклон уловитель,
- сбросные горелки,
- мельничный вентилятор.

Отсутствие вентилирующего воздуха в мельнице практически исключает опасность взрыва при измельчении угля с высоким выходом горючих летучих веществ, что, в свою очередь, означает универсальность системы по качеству измельчаемого угля.

Более мелкие шары удаляются из барабана и не участвуют в процессе измельчения угля. Все эти факторы, при прочих равных условиях, снижают потребление энергии на размол в шаровых барабанных невентилируемых мельницах на 10-15 процентов.

Однако, необходимость размещения промежуточного бункера в непосредственной близости к мельнице требует несколько более высокого размещения мельницы.

В таблице представлены описание предлагаемого и фактического процессов измельчения угля в шаровой барабанной мельнице, а также предложены возможные меры по сближению реального процесса с идеальным.[1]

Таблица 1. Перечень показателей шаровых барабанных мельниц

№ №	Сравниваемые показатели	Предлагаемый процесс	Реальная организация процесса измельчения	Возможные решения
1.	количество шаров, доставляемых удержателями в верхнюю точку барабана	количество шаров, доставляемых удержателями в верхнюю точку барабана(180 градусов), совпадает с их количеством в удержателях в нижней точке барабана	при прямоугольных удержателях в самую верхнюю точку барабана (180 градусов) доставляется примерно половина шаров, поступивших в держатели в нижней точке барабана	улучшить конструкцию удержателей
2.	Состав поднимаемой смеси шаров и угля	в верхнюю точку барабана поднимаются шары без угля с размерами близкими к исходному размеру	удержатели поднимают шары разных размеров и часть измельчаемого угля.	сделать конструкции удержателей из которых высыпаются шары с меньшими размерами и часть угля
3.	Сохранность силы удара	шары имеют постоянную силу удара при постоянном (исходный) размере	происходит постоянное уменьшение размера, (веса) шаров в связи с	использовать шары из металла стойкого к

	шаров об уголь		износом измельчаемым углем	абразивному износу
4.	Демпфирование слоем угля и шаров удара шаров	измельчаемый слой угля и части шаров имеет толщину, исключающую демпфирование верхним слоем удара шаров для нижнего слоя	измельчаемый слой угля и части шаров имеют толщину, которая демпфирует удар падающего шара	толщина слоя определяется степенью загруженности удержателей углем и шарами
5	Снижение веса барабана	вес шаров и измельчаемого угля составляет заметную часть от общего веса барабана (если отсутствует бронирование внутренней поверхности барабана)	вес броневых плит, сопоставим с общим весом барабана, шаров и измельчаемого угля	удаление броневых плит

Сравнение показало, что реальный процесс измельчения уступает предложенному практически по всем параметрам. Основные направления совершенствования включают:

- улучшение конструкции удержателей для снижения преждевременного выпадения шаров;
- увеличение числа удержателей для повышения частоты падения
- применение износостойких шаров;
- отказ от броневых плит или их замена на облегчённые конструкции.

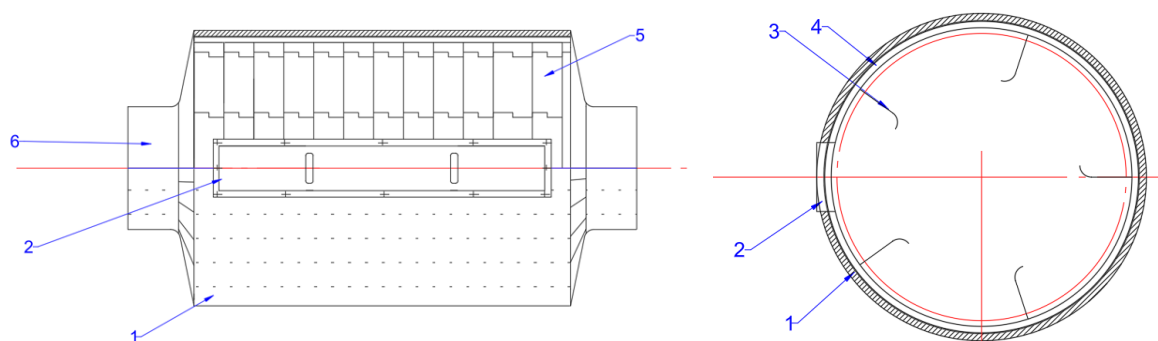


Рис.2. – Невентилируемая универсальная ШБМ: 1-корпус, 2-люк загрузки и выгрузки, 3-держатель, 4-сито, 5-броня, 6-подшипник.

Предложенное устройство обладает простой конструкцией (Рисунок 2). 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.[3]

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. [5]

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

2 Проведение исследования влияния размера шаров на интенсивность измельчения угля.

Цель исследования - оценить влияние размера шаров на эффективность измельчения угля и подтвердить целесообразность удаления шаров малых размеров из объема барабана.

Эксперимент проводился следующим образом: на одинаковый объем исходного материала (предварительно проверенного на дисперсный состав) с одинаковой высоты сбрасывалось равное количество шаров различных диаметров. Далее определялась степень измельчения угля.

Для испытаний использовались угли разного происхождения: Шубаркол, Қаражыра и Екибастуз. В качестве измельчающих тел применялись шарики диаметром 25, 30 и 40 мм. Высота падения составляла 1 метр (рисунок 3,4).

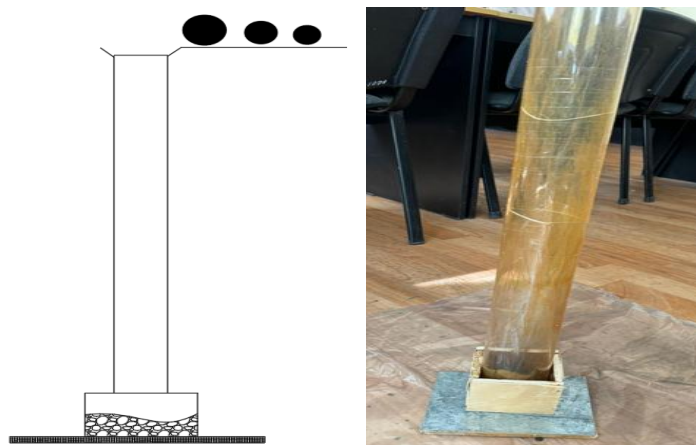


Рис.3. – Труба для падения шаров

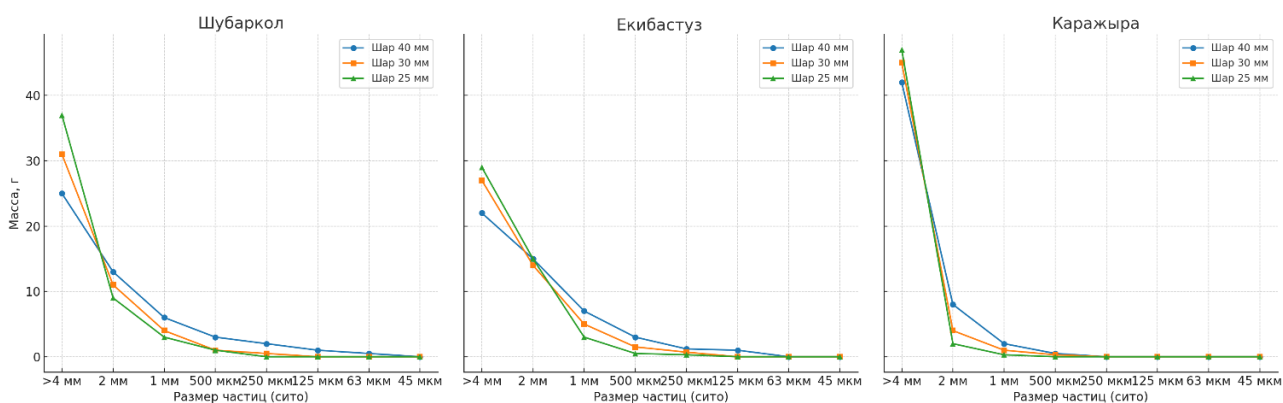


Рис.4. – Влияние диаметра шара на гранулометрический состав углей

Анализ показал, что ударная сила зависит от диаметра шаров и высоты их падения. При увеличении этих параметров наблюдается рост максимальной силы удара. Длительность одного удара составляет примерно 1 мс. Повышение диаметра шаров или высоты падения увеличивает гравитационную потенциальную энергию, что приводит к усилению ударного воздействия в мельнице.

Следовательно, оптимизация размеров мелющих тел и условий их падения позволяет существенно повысить эффективность измельчения угля.

Выводы: Предложенные конструктивные решения обеспечивают повышение эффективности шаровой барабанной мельницы, улучшение качества пылевидного топлива и снижение энергозатрат.

Список литературы

1. Алияров Б.К., Алиярова М.Б. Казахстан: энергетическая безопасность, энергетическая эффективность и устойчивость развития энергетики. - Алматы: Гылым, 2010. - 277 с.
2. Левит Г.Т. Пылеприготовление на тепловых электростанциях.-М: Энергоатомиздат, 1990. -384 с.
3. Каримолданова М.А.,Әкімбек Г.Ә., Алияров Б.К., Коробков М.С., Джакипова К.Т. Шаровая барабанная мельница для измельчения угля средней фракции.- Алматы: Вестник КазАТК .Том 133 № 4 (2024).
4. Лебедев А.Н. Подготовка и размол топлива на электростанциях.- Москва: Энергия, 1969.
5. Патент 2024/0392.1, от 16.05.2024. Невентилируемая универсальная мельница для измельчения твердых частиц средней фракции.

ДЕРБЕС ЖЫЛУМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ ЕКІ ТІЗБЕКТІ ГАЗ ҚАЗАНДАРЫН ҚОЛДАНУ ТИІМДІЛІГІ

Кемпірбеков Е.Н., Абильдинова С.К.

"Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті" КЕАҚ,
Алматы, Қазақстан

¹e-mail: y.kempirbekov@aes.kz, s.abildinova@aes.kz

Аңдатпа: Мақалада жылумен жабдықтау жүйелерінде екі тізбекті газ қазандарын қолдану мәселелері, олардың ерекшеліктері мен бір тізбекті қазандардан артықшылығы қарастырылады. Автономды жылумен қоса ыстық сумен жабдықтаудың заманауи шешімі – екі тізбекті газ қазанының экономикалық тиімділігі дәлелденді.

Ғимаратты жылумен қамтамасыз ету үшін заманауи талаптарға сәйкес, орташа қуатты (640 кВт) газ қазанының қазандықта орнату схемасы ұсынылды.

Ғылыми зерттеудің нәтижесінде кез келген пайдалану жағдайларында автономды жылумен жабдықтау жүйелері үшін толық зауыттық дайын модульдік қазандықтардың жоғары сенімділігімен ерекшеленетін екі тізбекті су жылыту автоматтандырылған газ қазандықтарының жаңа класын әзірлеу, құру, енгізу және дамыту қажеттілігі анықталды.

Тірек сөздер: Екі тізбекті газ қазаны, жылулық сұлба, қазандық қондырғылары, автономды ыстық сумен жабдықтау құрылғылары, автономды жылумен жабдықтау.

Кіріспе

Қазақстанда жылумен жабдықтау жүйелерін дамытудың қазіргі заманғы үрдісі - орталықтандырылған жүйелердің кенінен қолдана отыра, автономды жүйелердің сенімділігі мен тиімділігін арттыру болып табылады. Бұл үрдіс жылу өндірудің дербес көздерін құруды; тұтынушыға жылу жеткізу кезінде шығындарды азайтуды; қолданыстағы қазандық жабдықтарының тиімділігін арттыруды қамтиды. Бұл жұмыс автономды жылумен жабдықтаудың заманауи тиімді және сенімді жүйелерін зерттеу және құру мақсатында орындалды.

Қазақстанда жылумен жабдықтауды орталықсыздандыру тақырыбының өзектілігі үкіметтің энергия үнемдеуге және тұрғын-коммуналды шаруашылықты (ТКШ) реформалауға бағытталған саясатымен расталады [1,2]. Бұл жылу жүйелері мен коммуникациялардың техникалық жарамсыз жай-күйіне, моральдық ескірген және физикалық тозған жабдықтардың көп мөлшерінің болуына, сондай-ақ орталық қазандықтар мен жылу трассаларын қайта құруға, техникалық қайта жарақтандыруға немесе жаңадан салуға бюджет қаражатының болмауына байланысты. Сондықтан, көп жағдайда автономды жылу көздерін

қолдана отырып, орталықтандырылмаған жылумен жабдықтауға көшу толығымен негізделген. Екі тізбекті қазандары бар, үнемді, сенімді, бастапқы судың сапасы төмен және ескі жылу желілері жағдайында пайдалану кезінде қызмет ету мерзімі ұзартылған автономды жылумен жабдықтау жүйесі ұсынылады. Екі тізбекті қазандықтарда бір тізбек үй – жайларды жылыту үшін жұмыс істейді, екіншісі-ыстық су жүйесінде ыстық су дайындау үшін қолданылады.

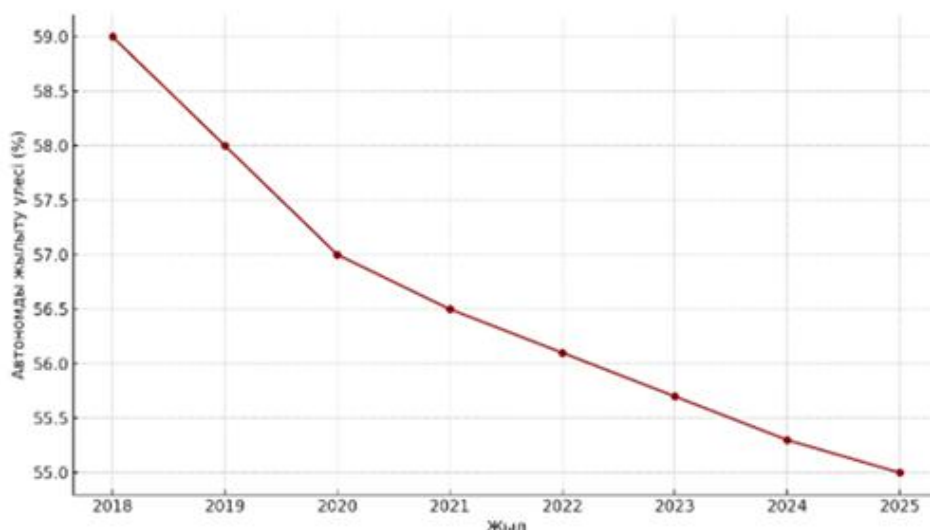
Бұл жұмыста жылумен жабдықтау процесінің барлық компоненттеріне қысқаша шолу жасалды (жылу энергиясын өндіру, беру және тұтыну), қазіргі заманғы жылумен жабдықтау проблемалары, дәстүрлі орталық жылумен жабдықтау жүйелерінің қазіргі жағдайы және олардың даму перспективалары, сондай-ақ екі тізбекті қазандықтары бар автономды қазандықтар негізінде автономды жылумен жабдықтау жүйелері қарастырылды. Қос тізбекті қазандықтарды пайдалануға көшу кезінде автономды жылумен жабдықтау жүйелерінің сенімділігі мен тиімділігін арттыру мәселелерінің кейбір шешімдері, жылу энергиясын өндіру саласын дамытудың заманауи тенденциялары және жаңа құрылыс немесе қайта құру кезінде жылумен жабдықтау жүйесін таңдау критерийлері ұсынылған [3].

ҚР-дағы ТКШ-ның әртүрлі объектілерінде іске асырылған отынды пайдалану тиімділігі, сенімділігі, беріктігі және экологиясы бойынша жоғары көрсеткіштері бар автономды жылумен жабдықтау жүйелеріне арналған модульдік қазандықтардың мысалдары келтірілген [4].

Ғылыми зерттеудің мақсаты кез келген пайдалану жағдайларында және олардың негізінде автономды жылумен жабдықтау жүйелері үшін толық зауыттық дайын модульдік қазандықтардың жоғары сенімділігімен ерекшеленетін екі тізбекті су жылыту автоматтандырылған газ қазандықтарының жаңа класын әзірлеу, құру, енгізу және дамыту қажеттілігін ғылыми негіздеу болып табылады.

Материалдар және зертеу әдістемесі.

Қазақстанның Ұлттық статистика бюросының деректеріне сәйкес, 2024 жылғы жағдай бойынша үй шаруашылықтарының 43,4% - ы дербес жылыту жүйелерін пайдаланған, ал 56,6% - ы орталықтандырылған жылу желісіне қосылған. Қалалық жерлерде үйлердің 73,4% - ы орталықтандырылған жылу желісін , ал 26,6% - ы автономды жүйелерді қолданады. Ауылдық жерлерде жағдай керісінше: үйлердің 80,9% - ы дербес жылыту жүйелерін пайдаланады, ал тек 19,1% - ы орталықтандырылған желілерге қосылған.



Сурет 1 – Қазақстандағы автономды жылу жүйелерінің үлесінің графигі (2018-2025 жж.).

Қол жетімді ақпарат негізінде автономды қазандықтарда қолданылатын отынның келесі негізгі түрлерін ажыратуға болады: Табиғи газ: шамамен - 40%; көмір: шамамен - 28%, электр қуаты: шамамен - 15%; ағаш отын: шамамен - 10%; пеллеттер: шамамен - 5 %.

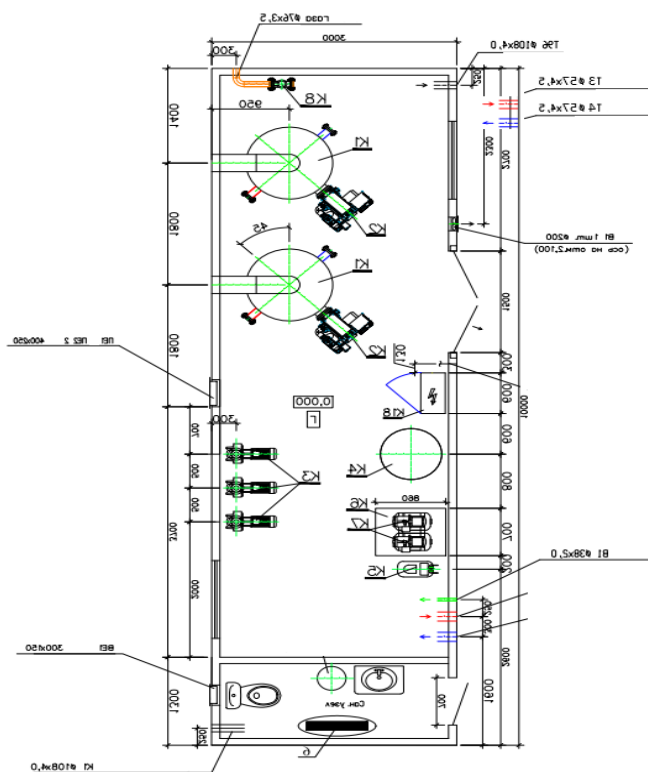


Сурет 2 – Қазақстанда автономды қазандықтарда қолданылатын отын түрлерінің құрылымы

Бұл деректер Қазақстанда көпшілік автономды жылыту үшін негізгі отын ретінде табиғи газды (40%) және көмірді (28%) пайдаланады.

Ауылдық жерлерде табиғи газ үйлердің 44,9% , ал көмір барлық үйлердің 17,8% - отынның негізгі көзі ретінде пайдаланылады; үй шаруашылықтарының 35,6% - ы бірнеше отын түрін пайдаланады.

Орташа қуатты екі тізбекті газ қазандықтары ғимараттарды жылытуды да, ыстық сумен жабдықтауды (ЫСЖ) да қамтамасыз ететін әмбебап жабдық болып табылады. Құрылысының арқасында бұл қазандықтар екі тәуелсіз тізбекті қамтиды. Бұл оларды жеке үйлерде, шағын қонақүйлерде және коммерциялық нысандарда ерекше сұранысқа ие етеді.



3 сурет - Қуаты 1,28 МВт блокты модульді қазандықтың жылулық сұлбасы

Көрсеткіш атауы	Өлшем бірліктері	Көрсеткіш
Жылу өнімділігі	кВт/(ккал/сағ)	640 (550000)
Соның ішінде ЫСЖ бойынша	кВт/(ккал/сағ)	112 (96550)

ЫСЖ өнімділігі, $\Delta t = 35^{\circ}\text{C}$	л/мин	30
ПӘК	%	91
Жылу тасымалдағышы		Су, МСТ 2874-82 және ... сәйкес
Температуралық кесте: жылыт. жүйелері	$^{\circ}\text{C}$	85/60
Температуралық кесте: ЫСЖ	$^{\circ}\text{C}$	10/55
Ең жоғары жұмыс қысымы	МПа (кгс/см ²)	0,35 (3,5)
ЫСЖ үшін	МПа	0,6 (6,0)
Шығатын газ температурасы	$^{\circ}\text{C}$	220
Отынның жылулық қабілеті және отын түрі		Дизельді $Q_{\text{рн}} = 10200$ ккал/кг, табиғи газ $Q_{\text{рн}} = 8000$ ккал/нм ³
Сұйықтықты қазандықтың көлемі	литр	391
Электр желінің параметрлері	В/Гц	220 (+-10%) / 50 +- 0,5
Габариттері (мм)		1140 x 1060 x 2038

Жұмыста жылыту және ыстық су жүйелеріне арналған Buran Boiler BV-5535 RG тік орташа қуатты газ қазанының техникалық сипаттамалары, функционалдық ерекшеліктері мен артықшылықтары қарастырылған. Оның пайдалану параметрлеріне, сондай-ақ әртүрлі жылумен жабдықтау объектілерінде қолдану мүмкіндіктеріне қысқаша талдау ұсынылған.

Заманауи жылыту жүйелері мен ыстық сумен жабдықтау жүйелері жоғары энергия тиімділігі, сенімділігі және әмбебаптығы бар жабдықты қажет етеді. Осындай шешімдердің бірі Қазақстандық «Буран Бойлер» компаниясы әзірлеген BV-5535 RG қазандығы болып табылады. Бұл қазандық орташа қуатты екі тізбекті қондырғылар санатына жатады және тұрғын, әкімшілік және өндірістік ғимараттарда қолдануға бағытталған [6].

BV-5535 RG газ қазандығы 640 кВт (550 000 ккал/сағ) номиналды жылу сыйымдылығына ие, максималды температурасы 85°C және жұмыс қысымы 3,5 барға дейін. Қондырғының тиімділігі 91% - ПӘК – тің құрайды. Қазандық $\Delta t = 35^{\circ}\text{C}$ температуралық айырмашылықта және өнімділігі 30 л/мин дейін жұмыс істеуге арналған тот баспайтын болаттан жасалған жылу алмастырғышпен жабдықталған.

Құрылғы тік дизайнға ие, бұл оның шектеулі кеңістікте орналасуын жеңілдетеді. Дизайн жүйелердің әрқайсысы тәуелсіз және тұрақты жұмысын қамтамасыз ететін бөлек жылу және ыстық су құбырларын қамтиды. Қазанның жану камерасы ауа өткізбейтін, мәжбүрлі ауа беру жүйесімен қамтамасыз

етілген, бұл отынның жану толықтығын және жалпы энергия тиімділігін арттырады. Табиғи газды да, сұйық отынды да қолдануға болады (оттықты ауыстырған кезде).

Қазан қашықтықтан басқару мүмкіндігімен заманауи басқару автоматикасымен жабдықталған. Ақау индикациялау жүйесі, сондай-ақ кіріктірілген қорғаныс механизмдері қарастырылған: қызып кетуден, су деңгейінің төмендеуінен, отын берудегі ақаулардан және салқындатқыштың қатуынан. Қондырғының электр қуаты $\pm 10\%$ рұқсат етілген ауытқулары бар 220 В/50 Гц құрайды.

BB-5535 RG тік газ қазандығы жоғары өнімділікті, сенімділікті, қауіпсіздікті және энергия тиімділігін біріктіреді. Оның техникалық параметрлері мен пайдалану қасиеттері жылу шығаратын жабдыққа қойылатын заманауи талаптарға сәйкес келеді, бұл оны автономды жылумен жабдықтау саласындағы көптеген міндеттер үшін ұсынуға мүмкіндік береді.



Сурет 2 – Су қыздырушы BB – 5535 қазаны

BB – 5535 қазанының модельдік қатары бір тізбекті сонымен қатар 1-суреттегі схемаға сәйкес орнатылған екі тізбекті қазаннан тұрады. Екі тізбекті қазанның айрықша артықшылығы - қазандықта суды жылытуға арналған кіріктірілген жылу алмастырғыш қарастырылған. Яғни құрылғының бұл түрінің бірнеше артықшылығы бар, біріншіден, конструктивті артықшылығы жеке жылу алмастырғыш немесе су жылытқышы үшін орынды үнемдейді. Сондай-ақ, негізгі жабдыққа, суық сумен жабдықтауға және жылыту жабдықтарын бөлек тізбекке байлауға кететін шығындар болмайды

Жұмыстың нәтижелері

Екі тізбекті газ қазанының тиімділігіне көз жеткізу үшін жұмыста екі қазандықты, біреуі BV-5535 моделінің орнатылған екі тізбекті қазандығымен, екіншісі сол объектіні ыстық сумен қамтамасыз ету үшін қазандықтағы жабдықты орнатуды ескере отырып, бір тізбекті қазандықпен салыстырғанда бастапқы су мен электр энергиясын тұтыну есебі жүргізілді.

Бұл талдау жалпы жылытылатын ауданы 1964,02 м² болатын 600 оқушы орындық мектептің жылумен жабдықтау және ыстық сумен жабдықтауды (ГВС) ұйымдастыруға арналған екі техникалық шешімді салыстырады. Бірінші нұсқа жылытуды (Т1-Т2) және ыстық сумен жабдықтауды (Т3-Т4) тікелей қамтамасыз ететін орташа қуатты екі тізбекті газ қазандығын орнатуды қамтиды. Екінші нұсқа бір тізбекті қазандықты қолдана отырып жүзеге асырылады, ал ГВС жүйесі жеке пластиналы жылу алмастырғыш және екі айналым сорғысы арқылы қамтамасыз етіледі.

Әрбір шешімнің экономикалық орындылығын бағалау үшін жұмсалатын су мен тұтынылатын электр энергиясының құнын, сондай-ақ қосалқы жабдыққа күрделі салымдарды қамтитын жылдық пайдалану шығындарын есептеу жүргізілді.

Есептеулер бойынша ыстық сумен қамтамасыз ету тізбегі 14 сағат жұмыс жасайды деп есептегенде, су шығыны екі нұсқа үшін бірдей оған көз жеткізу үшін келесі кесте қолданылады :

Кесте 2 - Ыстық сумен жабдықтауға арналған су шығыны (екі нұсқаға да ортақ)

Құрылғы	Саны	Шығын, л	Жалпы тәуліктік шығын, л
Қол жуу шүмегі	18	3	810
Дәретхана	18	8	1 440
Душ	2	60	240
Асхана (столовая)	1	150	150
ЖИЫНТЫҚ	—	—	2 640 л/тәулік = 2,64 м³/тәулік

Яғни жылдық шығыны :

$$V_{\text{жыл}} = 2,64 * 365 = 963,6 \frac{\text{м}^3}{\text{жыл}} \quad (1)$$

Келесі кезекте бір тізбекті қазанның қолданысымен жасалған жылу сұлбасын қарастырамыз. Ыстық сумен жабдықтау трассасына қосалқы жылуалмастырғыш орналастыру қажеттілігін ескерек отыра бұл сұлбаға қосымша екі сорғы орнату қажет [6]. Сорғылар мен жылуалмастырғышты таңдау үшін екі тізбекті қазанның сипаттамаларына жүгіне отырып, параметрлері тепе-тең келетін жабдықтарды есепке аламыз [7].

Жылуалмастырғышты таңдау барысында маркасы «Zilmet 14 PL Viessmann», қуаты 30 кВт пластиналық жылу алмастырғыш алынды. Оның негізгі техникалық көрсеткіші - өнімділігі: 1800 л/сағ дейін (30 л/мин).

Су сорғысы ретінде маркасы «Wilo Star-Z 15 TT» -2 дана сорғылар алынады, олардың жалпы өткізу қабілеті: 60 л/мин дейін, тұтыну қуаты 80 Вт жуық.

Су шығыны мен қазан модельдері бірдей екенің ескере отырып тек екі сорғының электр қуатын тұтыну айырмасын есептеп шығарамыз [8] , яғни :

$$E_{\text{жыл}} = 0,04 \times 2 \times 14 \times 365 = 409,6 \text{ кВт} \cdot \frac{\text{сағ}}{\text{жыл}} \quad (2)$$

Барлық есептеулерді кестеге енгізсек келесідей нәтиже шығады:

Кесте 3 – Бір тізбекті және екі тізбекті қазан моделдерінің жұмыс тиімділіктерін салыстыру кестесі

Көрсеткіштер	1-нұсқа: ЫСЖ бар қазандық	2-нұсқа: Жеке жылу алмастырғышпен
Оқу мерзімі бойы су тұтыну (м³)	2,684	2,684
Электр тұтыну (тәулігіне, кВт·сағ)	0 (ГВС кіріктірілген)	0.56 (40 Вт × 14 сағ)
365 күндегі электр тұтыну (кВт·сағ)	0	409,6
Электр құны (60 ₸/кВт·сағ)	0 ₸	15,552 ₸
Қазан бағасы (шамамен)	~1,200,000 ₸	~1,100,000 ₸
Жылу алмастырғыш (40–45 кВт)	Құрамында бар	~300,000 ₸
Сорғылар (2 дана)	Желілік сорғылар көмегімен	~120,000 ₸
Жалпы капиталдық шығындар	~1,200,000 ₸	~1,520,000 ₸

Қорытынды

Жұмыс барысында ВВ-5535 үлгісіндегі су жылыту қазандығының мысалында екі тізбекті газ қазанының жұмыс істеу принципі, қазандықта орналасу сұлбасы, таңдалған нышан бойынша шығындалатын су шығыны және де салыстырмалы түрде бір тізбекті қазан принципі бойынша жұмыс жасайтын қазаннан техникалық-экономикалық артықшылықтары есептелді.

ВВ- 5535 үлгісіндегі су жылыту қазандығын пайдалана отырып, мектеп ғимаратын жылумен қамтамасыз етудің екі нұсқасын салыстырмалы талдау

нәтижесінде нақты техникалық-экономикалық көрсеткіштер алынды. ГВС-тің кіріктірілген контурын қарастыратын бірінші нұсқа, шығатын пластиналы жылу алмастырғыш пен қосымша циркуляциялық сорғыларды қосу жүзеге асырылған екіншісімен салыстырғанда жоғары энергия тиімділігі мен аз күрделі шығындарды көрсетті. Екінші нұсқа ыстық судың ұқсас өнімділігін қамтамасыз етсе де, оның өтелу мерзімі 8 жылдан асады, бұл оны білім беру мекемесінің шектеулі бюджеті жағдайында экономикалық тұрғыдан тиімсіз етеді. Осылайша, ГВС интеграцияланған тізбегі бар қазандықты орнату энергия тиімділігі тұрғысынан да, бастапқы инвестициялардың параметрлері бойынша да оңтайлы шешім болып табылады деген қорытынды жасауға болады.

Әдебиеттер

[1] Постановление Правительства Республики Казахстан от 30 апреля 2011 года № 473. Об утверждении Программы модернизации жилищно-коммунального хозяйства Республики Казахстан на 2011–2020 годы. – Астана, 2011. – 25 с.

[2] Шарифов Д.М., Жанузак Ж.Б., Жамантаева Л. Современные тенденции развития котлов малой энергетики (мощностью до 100 Гкал/час) в Республике Казахстан // Инновации в науке. – 2012. – №10-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-tendentsii-razvitiya-kotlov-maloy-energetiki-moschnostyudo-100-gkal-chas-v-respublike-kazahstan> (дата обращения: 02.05.2025).

[3] Григорьев И.Т., Басов Г.И., Жидилов К.А., Киселев В.Ф., Коваленко В.В., Сергеенко Н.М., Хряпченков А.С. О высокой эффективности двухконтурных котлов в системе теплоснабжения // Труды Нижегород. гос. технич. ун-та. – 2008. – Т. 69. – С. 81–84.

[4] 88 котельных построят до 2023 года в Казахстане // Zakon.kz. URL: <https://www.zakon.kz/redaksiia-zakonkz/5060398-88-kotelnyh-postroyat-do-2023-goda-v.html> (дата обращения: 02.05.2025).

[5] Санцевич В.И. Блочно-модульная водогрейная котельная: практическое пособие. – Минск: ТетраСистемс, 2013. – 64 с.

[6] Информация о котле BB-5535 RG. URL: <https://buran.kz/catalog/otopitelnye-kotly/gazovye-kotly-otopleniya-i-gvs/vertikalnyy-gazovyy-kotel-sredney-moshchnosti/bb-5535-rg/#docs> (дата обращения: 02.05.2025).

[7] ҚР ЕЖ 4.02-105-2013 «Қазандық құрылғылары». – Астана: «ҚазҚСҒЗИ» АҚ, «Астана Строй-Консалтинг» ЖШС, 2014. – №156-НҚ бұйрығы, 2015 жылғы 1-шілдеден бастап. – Б. 48–50.

[8] ҚР ЕЖ 4.02-106-2013 «Жылумен жабдықтаудың автономдық көздері». – Астана: «ҚазҚСҒЗИ» АҚ, «Астана Строй-Консалтинг» ЖШС, 2014. – №156-НҚ бұйрығы, 2015 жылғы 1-шілдеден бастап. – Б. 15–18.

CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ТВЭЛОВ РЕАКТОРА ИВГ.1М

Мартыненко Е.А.^{1,2*}, Скаков М.К.³, Бекмулдин М.К.¹

¹Филиал «Институт Атомной Энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

²НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.

Серикбаева», Усть-Каменогорск, Казахстан

³Национальный ядерный центр Республики Казахстан,

Курчатов, Казахстан

* e-mail: Kirichek@nnc.kz

1 Введение

Реактор ИВГ.1М на базе НЯЦ РК является исследовательским ядерным реактором на тепловых нейтронах. В 2023 году была завершена конверсия активной зоны реактора с высокообогащенного уранового топлива на топливо с низким обогащением, которое является более безопасным в эксплуатации. Реактор с новой активной зоной введен в эксплуатацию, возобновлено проведение исследовательских работ [1, 2]. Проектная мощность реактора оценивается в 60 МВт, но на данный момент реактор эксплуатируется на мощности не более 10 МВт, в связи с ограничениями системы охлаждения. На данный момент одним из важных нерешенных вопросов является модернизация системы охлаждения, которая позволит повысить существующий предел реализуемой мощности и спектр проводимых исследований.

Поддержание расчётно-методической базы безопасной эксплуатации ядерного реактора в актуальном состоянии является ключевым элементом обеспечения ядерной и радиационной безопасности, надёжности и эффективности работы реактора. Одним из важнейших факторов, влияющих на безопасность, эффективность и срок службы ядерного топлива в реакторе, является соблюдение установленных температурных режимов работы тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов). В ситуациях, когда невозможно напрямую измерить теплотехнические параметры в материалах конструкции активной зоны, широко применяются численные методы вычислительной гидродинамики, реализованные в специализированных программных продуктах. Эти программы позволяют не только оценивать теплотехническое состояние топливных сборок и элементов активной зоны, но и моделировать их поведение при различных режимах эксплуатации [3], включая отклонения от регламентированных условий охлаждения, а также прогнозирование развития внештатных и аварийных сценариев.

В работе представлены компьютерные модели, разработанные в программном комплексе ANSYS Fluent, которые позволяют определять температурное состояние ТВЭЛов тепловыделяющих сборок (ТВС) активной зоны реактора ИВГ.1М при различных условиях эксплуатации.

2 Компьютерное моделирование теплового состояния ТВЭЛов в тепловыделяющей сборке реактора ИВГ.1М

Компьютерное моделирование теплового состояния ТВЭЛов выполнено с использованием программного комплекса ANSYS 2021R2, который предназначен для численного решения задач, связанных с гидродинамическими и тепловыми процессами [4].

Для выполнения моделирования теплофизических процессов в данном программном обеспечении требуется последовательное выполнение следующих этапов [5]:

- формирование геометрической модели;
- генерация конечно-элементной сетки;
- задание начальных и граничных условий;
- определение характеристик материалов;
- проведение расчета и анализ полученных результатов.

На рисунке 1 приведена трехмерная модель, представляющая собой симметричный сектор ТВС, включающий теплоноситель и один твэл. Твэл в модели полностью соответствует реальным геометрическим размерам с учетом шага закрутки, составляющего 30 мм. Расчетная модель представлена с наложенной конечно-элементной сеткой.

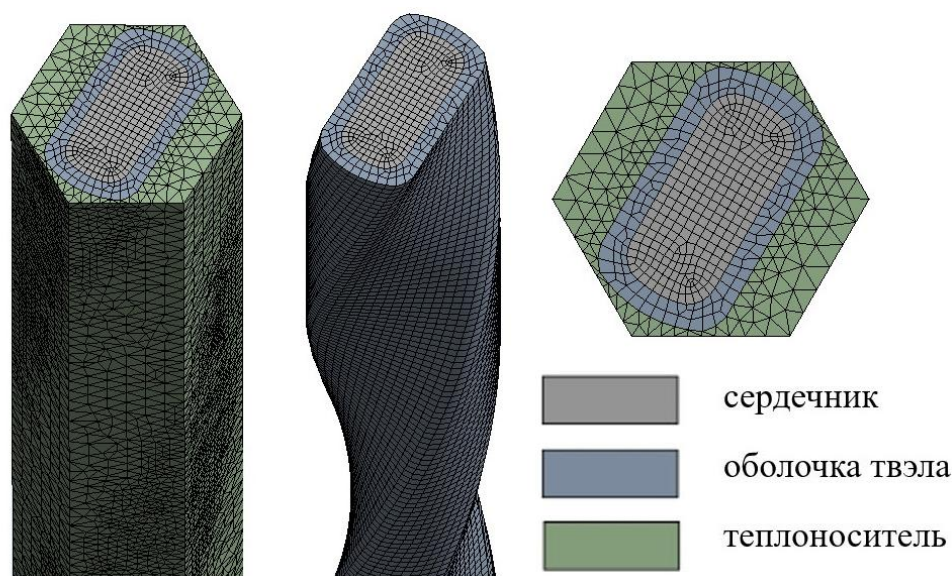


Рис. 1. - Расчетная модель

В ходе теплофизического моделирования с использованием приведенной компьютерной модели были заданы следующие граничные условия:

- на боковые поверхности модели наложены условия симметрии;
- для описания течения теплоносителя использованы граничные условия типа «скорость на входе» (velocity inlet) и «выход потока» (outflow);
- давление в контуре охлаждения установлено на уровне 1 МПа;

- неравномерное распределение энерговыделения по высоте сборки учтено с использованием текстового файла, содержащего соответствующий профиль.

Данные по энерговыделению, использованные в расчетах, получены из результатов нейтронно-физического анализа [6].

Теплофизические свойства материалов заданы в виде температурно-зависимых функций.

Для проведения поверочного расчета была выбрана максимальная номинальная мощность реактора, реализованная при проведении энергетических пусков реактора, равная 10,22 МВт [2]. Условия течения теплоносителя, также заданы в соответствии с зарегистрированными на пуске значениями.

Объемное распределение температурного поля, полученное в результате расчета приведено на рисунке 2. На рисунке 3 приведено температурное поле и векторное поле скоростей поперечного разреза модели на высоте с максимальным энерговыделением (0,49 м).

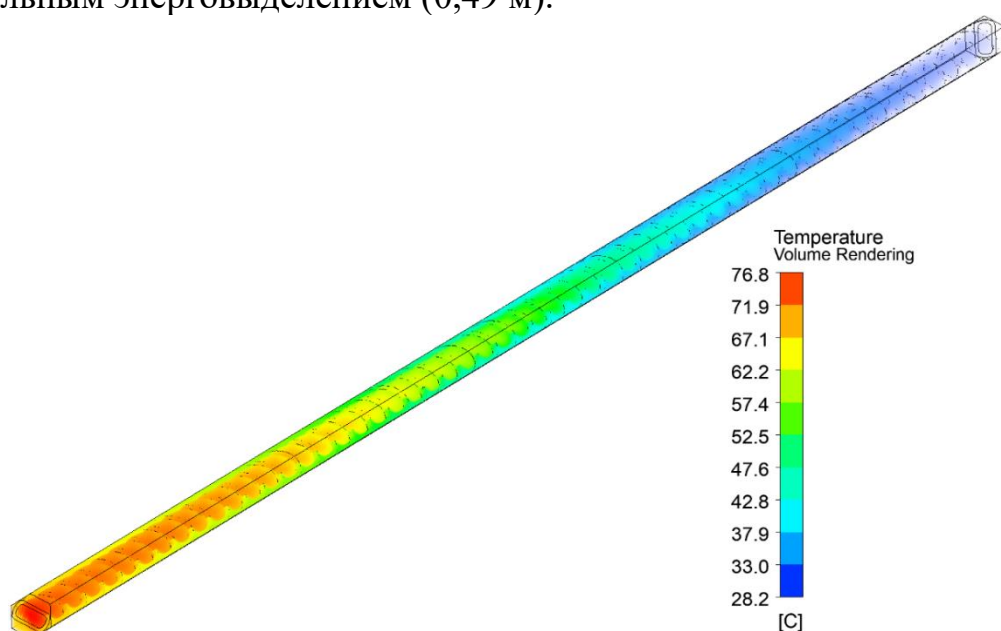


Рис. 2. - Объемное распределение температурного поля

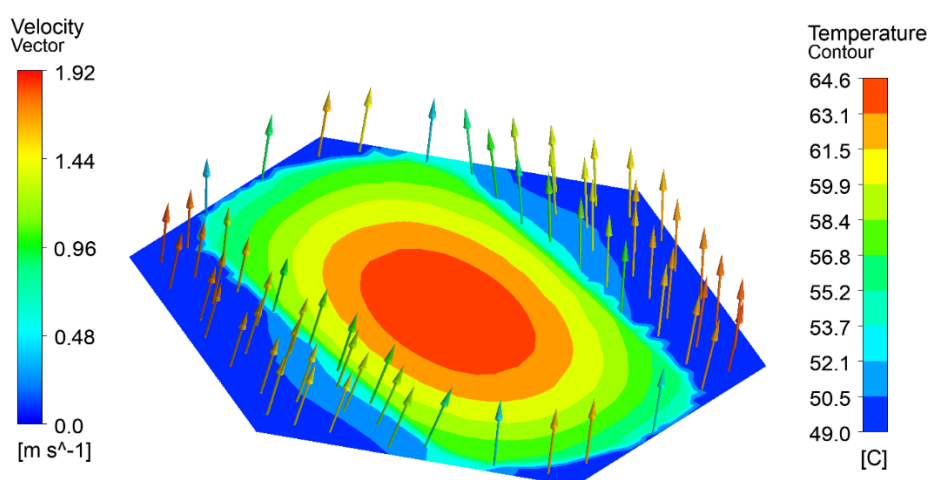


Рис. 3. - Температурное поле поперечного разреза модели.

В результате проведения серии расчетов и сравнения с экспериментальными данными, величина среднеквадратичного отклонения экспериментальной и расчетной температуры воды на выходе из ТВС составляет $\sim 0,23$. Хорошая согласованность расчетных результатов с экспериментальными данными позволяет судить об адекватности расчетной модели и выбранной методики расчета.

Для определения пространственного распределения температуры в топливной сборке построена трехмерная компьютерная модель. Геометрия модели представляет собой сектор, составляющий $1/12$ тепловыделяющей сборки. ТВЭЛы модели соответствуют реальным размерам с учетом витой структуры. Внутренний диаметр модели соответствует диаметру осевой вставки из циркониевого сплава, внешний диаметр модели соответствует диаметру обечайки ТВС.

Расчетная модель с нумерацией твэлов приведена на рисунке 4.

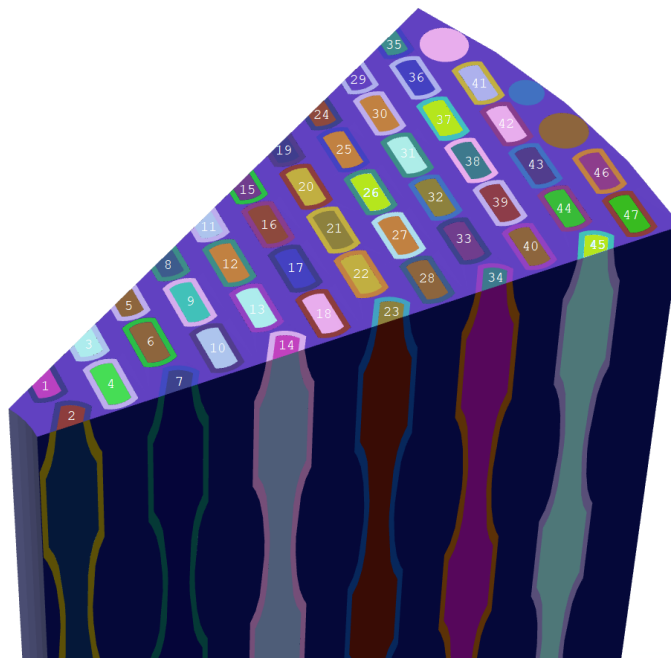


Рис. 4. - Модель ТВС реактора ИВГ.1М

Геометрия модели не позволяет использовать условие симметрии или периодичности на боковых гранях. По приведенной причине на боковые грани задано условие «стенка» (wall), что влияет на объективность распределения температур в ТВЭЛлах на боковых гранях модели.

Для проведения теплофизического расчета выбран сектор ТВС, который включает ТВЭЛы с наибольшими значениями энерговыделения. Энерговыделение для каждого ТВЭЛа задано согласно данным нейтронно-физических расчетов [6] с помощью текстового файла с учетом изменения по высоте.

С применением данной модели также было проведено моделирование теплового состояния на уровне мощности работы реактора 10,22 МВт. Результаты расчета показывают хорошую согласованность с экспериментальными данными.

Следующим этапом работы было проведение расчета на более высоком проектном уровне мощности работы реактора 35 МВт. Температура воды на входе в ТВС принята равной 50°C, что является предельным значением нормальной эксплуатации ВОТК. Расход воды через ТВС принят равным 7,7 кг/с.

Течение теплоносителя при моделировании определяется граничным условием массового расхода воды на входе и условием выхода потока. Расход воды в соответствии с геометрией модели составляет 1/12 часть от общего расхода, давление воды на входе принято равным 1,1 МПа.

На рисунке 5 приведено температурное поле модели, полученное в результате компьютерного моделирования. Наиболее высокие температуры ТВЭЛов локализованы на уровне расположения максимального энерговыделения по высоте сборки. На рисунке 6 приведено температурное поле поперечного сечения модели ТВС при мощности работы реактора 35 МВт, на уровне максимального энерговыделения (0,49 м).

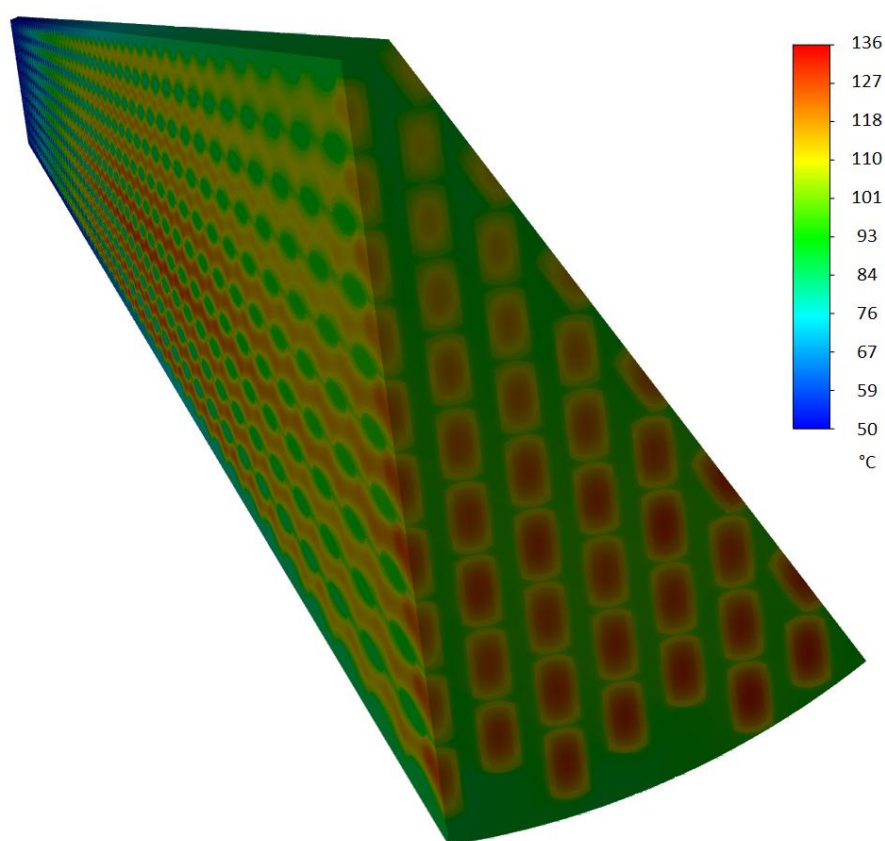


Рис. 5. - Температурное поле модели на уровне мощности работы реактора 35 МВт

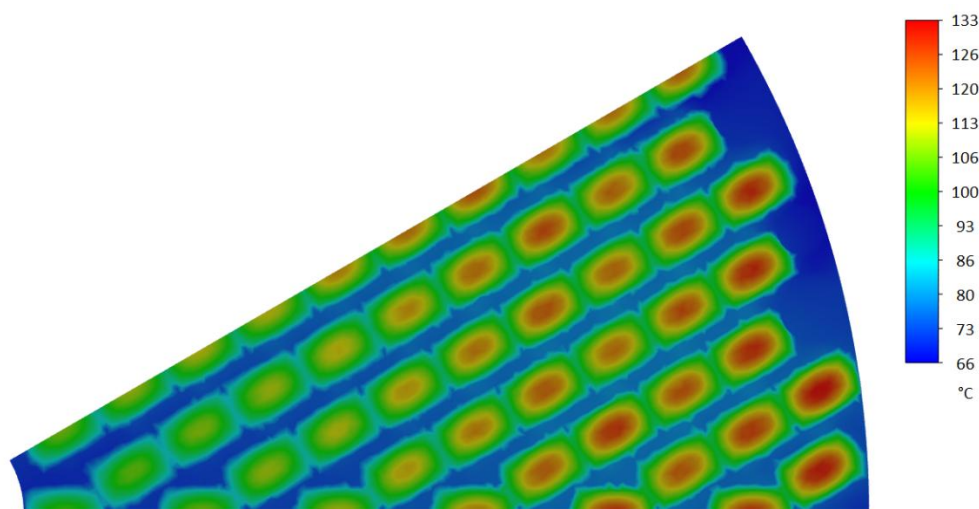


Рис. 6. - Температурное поле поперечного сечения модели (35 МВт) на уровне максимального энерговыделения

Выводы

В современных реалиях компьютерное моделирование является неотъемлемым инструментом современного ядерного инжиниринга, который позволяет обеспечить безопасность, эффективность и надёжность эксплуатации ядерных реакторов как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации и модернизации.

Представленные компьютерные модели являются частью расчетно-методического комплекса безопасной эксплуатации реактора ИВГ.1М и будут использованы для периодического определения теплофизических характеристик активной зоны, а также для анализа теплопереноса и гидравлических процессов в ТВС при обосновании безопасной работы реактора на различных уровнях стационарной мощности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Проект программно-целевого финансирования BR21882185 «Исследования в поддержку создания и безопасного функционирования атомной электростанции в Республике Казахстан»).

Список литературы

1. Sabitova R., Popov Y., Irkimbekov R., Prozorova I., Derbyshev I., Nurzhanov E., Surayev A., Gnyrya V., Azimkhanov A. Results of Experiments under the Physical Start-Up Program of the IVG.1M Reactor. *Energies*. – 2023. – 16(17). – 6263. <https://doi.org/10.3390/en16176263>.
2. Batyrbekov E., Vityuk V., Baklanov V., Gnyrya V., Azimkhanov A., Sabitova R., Prozorova I., Popov Yu., Irkimbekov R., Martynenko Ye. Power Start-Up of the IVG.1M Reactor with Low-Enriched Uranium Fuel: Main Results. – 2025. <https://doi.org/10.3390/en18123187>.

3. Skakov M.K., Martynenko Ye.A., Yerdybayeva N.K., Akayev A.S., Bekmuldin M.K., Prozorova I.V. Thermal technological condition of IVG.1M research reactor core under various operating modes. Eurasian Physical Technical Journal. – 2024. – Volume 21. – № 3(49). <https://doi.org/10.31489/2024No3/45-53>.

4. ANSYS Fluent Workbench Tutorial Guide Release 2021 R2. (2021), ANSYS Inc., Southpointe.

5. Бруяка А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов, И. Е. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учеб.пособ. Самара: Самар.гос.техн.ун-т. – 2010. – 217 с.

6. Sabitova R.R., Prozorova I.V., Irkimbekov R.A., Popov Yu.A., Bedenko S.V., Prozorov A.A., Mukhamediyev A.K. Methods to study power density distribution in the IVG.1M research reactor after Conversion. Applied Radiation and Isotopes. – 2022. – Volume 185. – 110259, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110259>.

УДК 536.421.1; 622.245.5 (088.8)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ КАК НОВЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю.*, Мугалбек Е.

Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы,
Казахстан

* e-mail: d.bondartsev@aes.kz

1 Введение

Детали ракетных, газотурбинных установок (камеры сгорания и сопла) изготавливают из никелевых сплавов, которые начинают плавиться при температурах от 1200 до 1400 °С. Поэтому детали защищают огнеупорными материалами (покрытиями) и охлаждают изнутри. Покрытия выполняют из циркония с керамикой, которые должны иметь очень низкую теплопроводность. Тогда температура металла под ними будет на 250÷350 °С ниже, чем на поверхности покрытия. Лопатки выполнялись из текстурированных микроструктур и внутреннего охлаждения.

Однако наибольший коэффициент полезного действия установки достигается при температурах 1500 и 1600 °С (соответственно 60 и 61%). Эти температуры являются предельными для современных материалов, причем детали из никелевых сплавов отливают как монокристалльные и являются сверхдорогими и ненадежными, а внутренние каналы для хладагента отливают в компонент. В настоящее время поликристаллы считаются перспективнее монокристаллов.

Итак, считая покрытия на основе оксида циркония, стабилизированного иттрием, основным, стандартным и налаженным в промышленном производстве, причем обязательно охлаждаемым той или иной системой теплообмена, поставим задачу поиска покрытий для будущих ГТУ, работающих от 1200 и 1500 °С и даже 1600 °С. Для этого общая система покрытий будет состоять из металлургических элементов (металлургические сетки, образующие структуры) и природных минеральных сред, нанесенных детонационным способом на защищаемый металл ГТУ, охлаждаемый двухфазным потоком в поле капиллярных и массовых сил. Такой интегрированный (синэргический) материал должен иметь улучшенные характеристики, причем главным образом – теплотехнические, а во-вторых – прочностные (см. рис. 1) [1].

Поиск материалов покрытий может затянуться, поскольку исследователь должен проанализировать большое количество вариантов, связанных с добавкой многочисленных компонентов, когда существуют тысячи возможных соединений для поиска. Поэтому нами, выбираются поликристаллы в виде гранитов, порфиритов, кварцитов, тешенитов, мраморов и туфов, которые детонационным напылением наносятся толщиной от сотен микрон до нескольких миллиметров на металлическую конструкцию деталей ГТУ и охлаждаются двухфазным кипящим потоком с применением оптимизированных сетчатых структур [2]. Охлаждение полезно и струйное, форсункой.

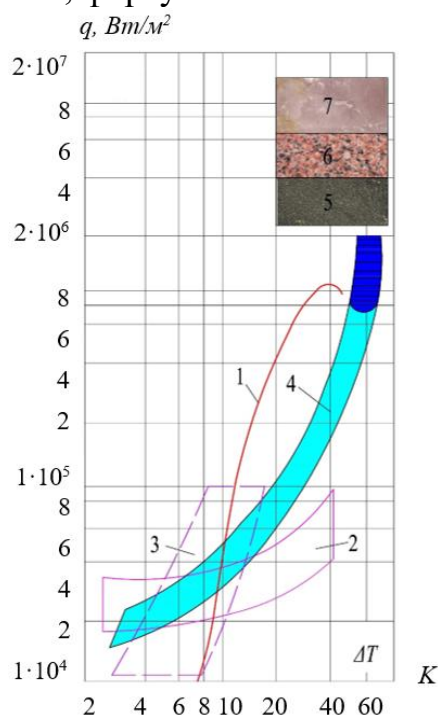


Рис. 1. – Зависимость удельного теплового потока на перегрев стенки относительно температуры насыщения ($P = 0.1$ МПа): 1 – кипение на гладкой стенке [3]; 2 – теплопередающие аппараты с пористыми структурами из сеток [4]; 3 – кипение в пленках [5]; 4 – исследования авторов для условий совместного действия капиллярного и массового потенциала с интенсификаторами [1]; 5, 6, 7 – исследования природных материалов для тешенитных (5), гранитных (6) и кварцевых (7) покрытий соответственно [2].

Предлагаемые покрытия являются термобарьерными, т.к. имеют низкий коэффициент теплопроводности, а также противостоят агрессивной среде, эрозии, коррозии. Прочностные характеристики позволяют работать при термических напряжениях ниже, чем допускаемые напряжения сжатия, растяжения, сдвига [1, 2]. При циклических нагрузках (пуск и останов ГТУ) за счет интегрированных покрытий с малой и большой пористостью, гранитное покрытие, в которое внедряется покрытие из туфа детонационным напылением, обеспечивает требуемую деформацию без разрушения и отсутствия фазовых превращений в покрытии, когда происходит изменение объема и снижение деформационной совместимости.

Проведенный нами эксперимент показал, как это следует из голографических интерферограмм, что покрытия выдерживали существенные деформации без разрушения, когда нагружение образцов осуществлялось одним и несколькими тепловыми источниками при многократном термоциклировании [1].

Поскольку покрытия должны иметь столь большое количество требований для ГТУ, то становится понятным, почему тугоплавкие оксиды являются центром поиска новых, либо альтернативных материалов.

Предложенные нами покрытия из естественных минеральных сред, в том числе многослойные, как внешний слой, работающий при более высоких температурах, так и сетчатые оптимизированные структуры как внутренний слой, служащие как система охлаждения, являются интегрированной и многофункциональной защитной системой высоконагруженных деталей ГТУ.

Из всех перечисленных требований к защите главным является тепловая часть, в которой внешний слой имеет низкий коэффициент теплопроводности, а внутренний – высокоинтенсивную двухфазную капиллярно-пористую структуру охлаждения внешнего слоя покрытия.

Экспериментально обнаружено [2], что теплопроводность высокотемпературных материалов (почти всех оксидов) уменьшается как $1/T$, а оксид циркония не зависит от температуры T при высоких ее значениях, и очень похож на оксид плавленного кварца, что весьма интересно для горных кварцосодержащих пород (граниты, кварциты).

В то же время моноклинный диоксид циркония, который не содержит стабилизаторов и, следовательно, не имеет связанных точечных дефектов, демонстрирует классическую зависимость $1/T$. Отсутствие зависимости $1/T$ объясняется очень высокими концентрациями точечных дефектов, которые рассеивают фононы.

Диоксид циркония один из немногих тугоплавких оксидов, которые можно осаждать в виде толстых пленок детонационным способом (распылительная технология). В условиях термоциклирования потребовалась идентификация иттрия как стабилизатора, что значительно уменьшало теплопроводность.

Таким образом, при создании нами теплозащитного покрытия главным направлением выбрано обеспечение теплотехнических характеристик (см. рис. 1). В то же время материалы проявили высокие прочностные свойства при воздействии детонационным факелом. Термозащитное покрытие основано на интеграции природных материалов и сетчатых структур.

Конвергенция наук определила выбор теплопроводности покрытий, высокоинтенсивного теплообмена системой охлаждения, и сами материалы в виде кристаллических естественных минеральных сред, содержащих оксиды циркония (интегрируются науки, так же как теплотехника, кристаллография, минералогия, кристаллохимия).

Рассмотрим будущие направления поиска учеными покрытий в сравнительном аспекте с настоящими исследованиями. Считается, что поиск материалов с низкой теплопроводностью для покрытий только начинается. Имеющийся набор тугоплавких оксидов столь широк, что идентифицировать перспективный состав не реально, это потребует больших вложений и времени.

Поэтому исследователи видят быстрый прогресс подбора покрытий в использовании интуиции о кристаллических структурах и моделировании. Нами определен материал покрытия в виде естественных минеральных сред. Моделирование же сводится к расчету и сравнению материалов с оксидами циркония и, например, с пироксеном, или фторидом оксидов, гранитами, монокитами, кварцевыми стеклами, нанокристаллическими материалами и возможно с тысячами других различных соединений для поиска.

Однако возможности моделирования показали, что значения теплопроводности сильно коррелированы, а сам подход сильно ограничен, т.к. нет сведений о химическом беспорядке, наличие примесей, пористости в выбираемых материалах.

В настоящем исследовании подобие и моделирование основаны на реальном натурном эксперименте интуитивного выбора естественной минеральной среды в сочетании с капиллярно-пористой структурой системы охлаждения, в которой задаются слоистость покрытия при детонационном спиноном напылении, пористость покрытия и требуемый уровень охлаждения покрытия для стабилизации минимальной теплопроводности и нужного уровня отвода теплоты двухфазной системой охлаждения.

Только натурный эксперимент устанавливает, будет ли сохраняться минимальная теплопроводность покрытия при температурах более 500÷1000 °С, что проблематично для всех современных тугоплавких (огнеупорных) материалов.

В этом заключается ожидание в открытии нового, когда, наоборот, материалы с низкой теплопроводностью при высоких температурах будут иметь противоположные характеристики для покрытия, и поэтому, материалы с большей теплопроводностью, как в исследованном покрытии при высоких температурах обеспечат лучшие термозащитные свойства.

2 Материалы и методы исследования

Перспективным тепловым прибором для нанесения покрытий из природных материалов является горелка ракетного типа, имеющая высокотемпературные сверхзвуковые пульсирующие детонационные струи (факелы). Необходимо изучить нанесение покрытий напылением.

Для проведения детонационного режима работы нами предложен перспективный способ конструктивного оформления сверхзвукового сопла за счет укороченной диффузорной части (см. рис. 2).

Нами разработана унифицированная горелка для нанесения покрытий с целью расширения применения порошков минеральной среды различной крепости. Используются различные топливные компоненты (кислород + керосин; воздух + керосин; воздух + бензин). Сопловой аппарат и кожух горелки оформляется в виде КПС или покрытия. Энергоразделитель выполняется в виде вихревой камеры, камера снабжается соплом. Сопло энергоразделителя выполняется кольцевым, сверхзвуковым [1]. Покрытия напылялись огневым методом сверхзвуковой детонационной высокотемпературной струей. Порошком служили частицы минеральной среды (кварц, гранит, тешенит, туф и мрамор) [2].



Рис. 2. – Вид полигона с тремя одновременно работающими термоинструментами.

Покрытия наносились на теплообменную поверхность (металлическую стенку) термоинструментом (ракетной горелкой) при температуре до 2500–3500 °С и скорости потока до 2500 м/с, используя для этого мелкую фракцию (шелушку). Режимы нанесения покрытий осуществлялись при следующих параметрах горелки: расход кислорода $G_{\text{кис}}$ до 18 нм³/час, расход керосина $G_{\text{кер}}$ до 12 л/час. Давление кислорода – 1.2÷1.5 МПа. Критический диаметр сопла $d_{\text{к}} = (4\div5)\times 10^{-3}$ м, диаметр камеры сгорания $d_{\text{к.с.}} = 14\times 10^{-3}$ м (см. рис. 2, 3).

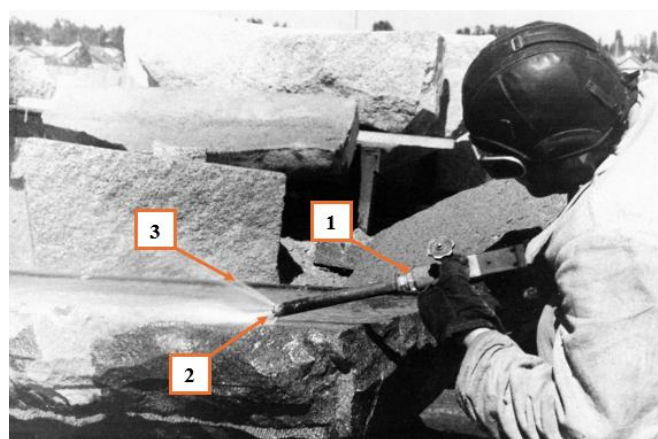


Рис. 3. – Термоинструмент 1 в детонационном режиме работы. Взаимодействие факела 2 с гранитным покрытием. Вода 3 предназначена для охлаждения и технологических целей.

На рисунке 4, 5 показана «шелуха», полученная при термобурении гранита.

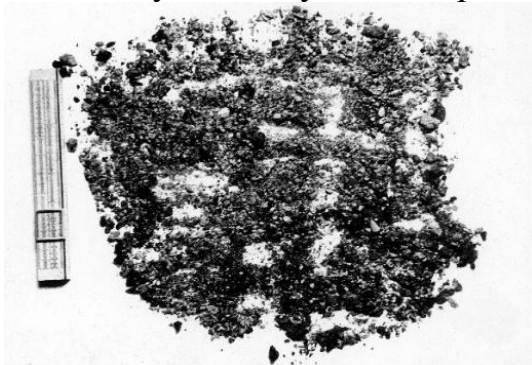


Рис. 4. – Шелуха крупных размеров, полученная при термобурении гранита термоинструментом. Из нее отбирались с помощью сита частицы по крупности (см. рис. 5).

Подготовка бурового шлама («шелухи») гранита при термобурении для напыления порошка на металлическую подложку (см. рис. 5).

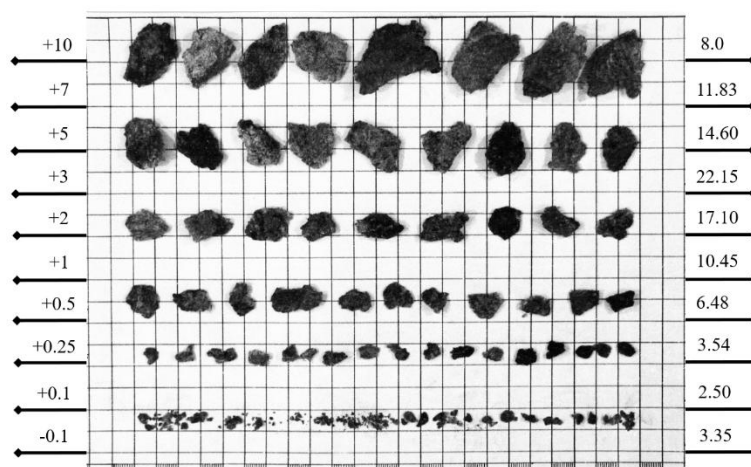


Рис. 5. – Отбор частиц гранита для напыления на металлическую подложку (медь М2 и нержавеющая сталь 1Х18Н9Т). Частицы отбирались по крупности: 0.1×10^{-3} м (2.9%); 0.25×10^{-3} м (3.8%); 0.5×10^{-3} м (7.1%).

Частицы отобраны по крупности в мм (y) и в процентах по весу ($y^{\prime}$). Керосино-кислородная ракетная горелка работала при расходе кислорода $G_{\text{кис}} = 15 \text{ м}^3/\text{ч}$; расход керосина $G_{\text{кер}} = 10 \text{ кг/ч}$; давление кислорода – $1.4 \div 1.5 \text{ Мпа}$; критический диаметр сопла $d_k = 5 \times 10^{-3} \text{ м}$; $\alpha_k = 0.8$; $T_a = 2780 \text{ К}$; $W_a = 2410 \text{ м/с}$.

3 Результаты и их обсуждение

Ранее в работе [2] был выполнен эксперимент с применением голографии и скоростной киносъемки, в результате проведенного эксперимента были получены интерферограммы которые позволили обнаружить на поверхности покрытиях трещины, не просматриваемые визуально, а также крупные включения, в области которых линии равных деформаций имели изломы.

Оценка действия напряжений покрытий уменьшает вероятность возникновения трещин при создании устройств и позволяет управлять развитием опасных трещин. Исследования современных технологий поверхностей и покрытий обычно рассматривают целостность термически напыленных покрытий металлов и сплавов на основе воздействия напряжений растяжения и деформаций. Однако для предельного состояния природных покрытий из минеральной среды (см. рис. 6, 7, 8, 9), при определенных размерах δ частиц и времени подачи удельного теплового потока решающую роль в разрушении покрытия имеют напряжения сжатия. Покрытие с тремя тепловыми источниками представляет собой экран, который поглощает ударные и детонационные волны.

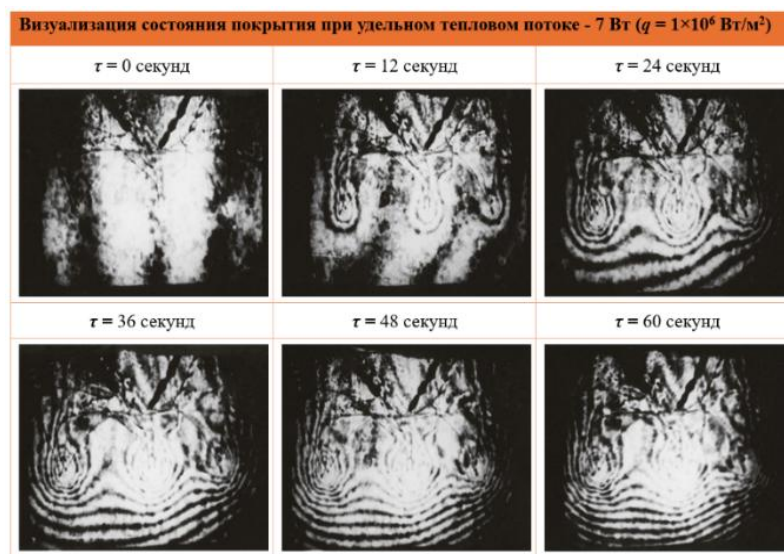


Рис. 6. – Интерферограммы покрытия из тешенита.

Различные методы термического напыления дают различную микроструктуру и отношение напряжения сжатия, растяжения и сдвига к деформации. Это связано с прочностью сцепления между частицами минеральной среды, т.к. полностью или частично расплавление частицы порошка металлов ударяются и затвердевают на подложке, а степень сцепления между частицами металлов может составлять всего 20÷80 % площади поверхности границ частицы.

Для термического напыления металлов и сплавов стремятся к максимальному расплавлению частицы, что положительно влияет на коррозионную способность капиллярно-пористого покрытия.

Для частиц минеральной среды проблема кавитационного эрозионного износа капиллярно-пористых покрытий не является основной. Расшифровка интерферограмм (см. рис. 6, 7, 8, 9) для всех покрытий показывает нелинейную кривую перемещения частиц, причем кислородно-керосиновое напыление имеет преимущество в том, что расплавление частиц на капиллярно-пористом покрытии достигается с помощью спинового детонационного факела на поверхности покрытия [2]. Это значительно снижает разрушение частиц

порошка по границам раздела нерасплавленных частиц в капиллярно-пористом покрытие.

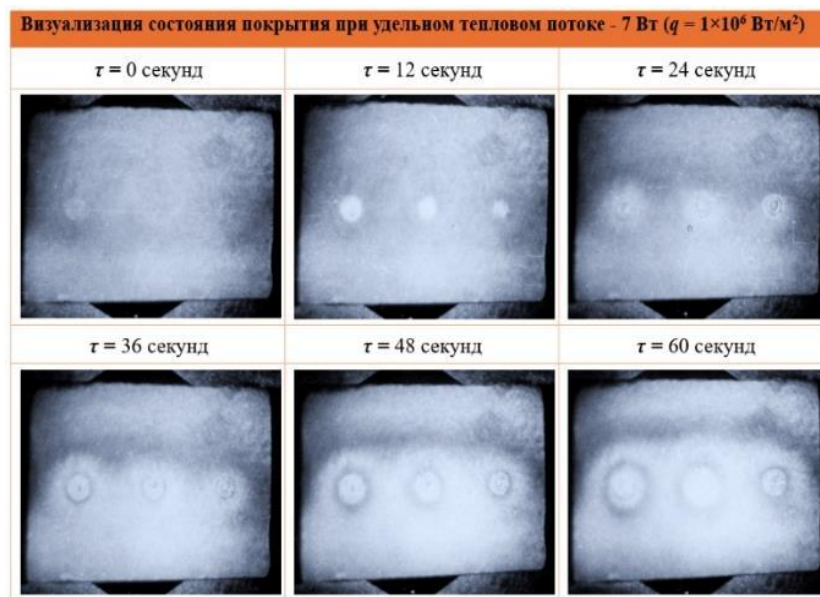


Рис. 7. – Интерферограммы покрытия из мрамора.

Для исследования с помощью интерфериметрии точкой отсчета всегда будет остаточная деформация в капиллярно-пористом покрытие, определяемая сетью мелких трещин, которые не исчезают при снятии тепловой нагрузки.

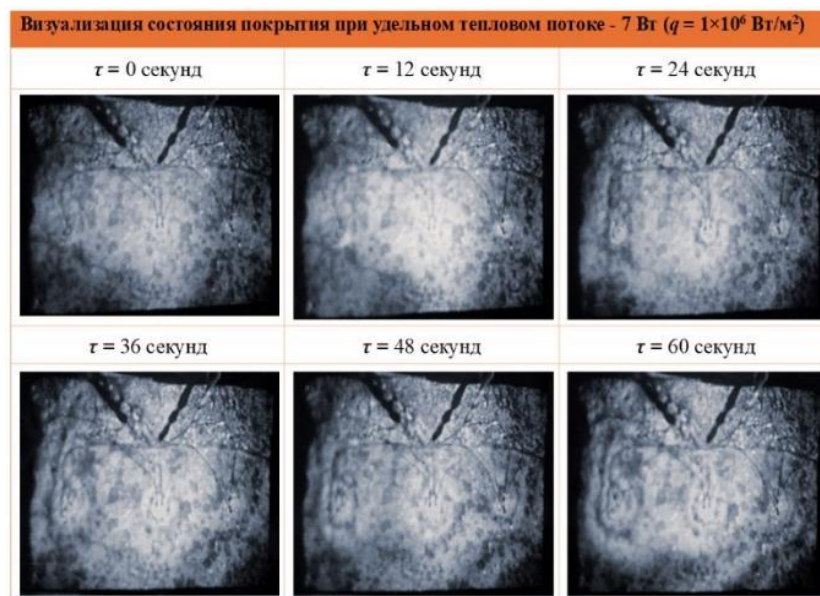


Рис. 8. – Интерферограммы покрытия из гранита.

Создаваемое термическим способом капиллярно-пористое покрытие будет всегда анизотропно, что имеет преимущества в процессе охлаждения, т.к. активнее участвуют капиллярные силы в равномерности распределения охлаждающей жидкости.

При воздействии теплового потока q на капиллярно-пористое покрытие частицы разрушаемого материала близлежащие к поверхности нагрева, находятся в сложно напряженном состоянии (см. рис. 6, 7, 8, 9). Они испытывают одновременно действие деформации сжатия, растяжения и изгиба [2].

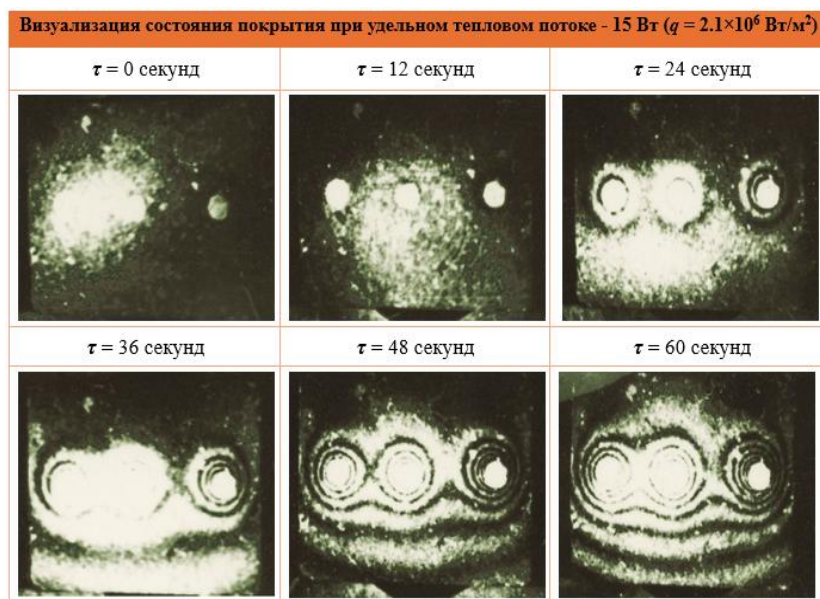


Рис. 9. – Интерферограммы покрытия из туфа.

Предельные области тепловых нагрузок для капиллярно-пористых покрытий из естественных минеральных сред имеют значения: тешенитные покрытия – $(2.1 \div 4) \times 10^6$ Вт/м², гранитные покрытия – $(4 \div 6) \times 10^6$ Вт/м² и кварцевые покрытия – $(6.2 \div 15) \times 10^6$ Вт/м². Тепловые нагрузки находились в зоне перегрева поверхности относительно температуры насыщенного водяного пара $\Delta T = T_{\text{ст}} - T_{\text{н}} = (20 \div 75)$ К (см. рис. 1).

Заключение

В заключение требуется отметить, что работа направлена на исследование процессов создания покрытий из природных материалов, таких как граниты, кварциты, тешениты, мраморы и туфы, что особенно актуально в условиях перехода к экологически безопасным и ресурсосберегающим технологиям. Полученные результаты могут стать основой для разработки новых решений в энергетике, машиностроении и аэрокосмической промышленности:

1. Создан инновационный термоинструмент, имеющий спиновую структуру детонационного факела, дожигаемого на поверхности природного покрытия, и имеющей пульсирующую двухфазную высокотемпературную высокоскоростную струю. Поперечная скорость участка воспламенения спинового факела близка к скорости детонации.

2. Исследование механизмов теплообмена проводилось с использованием уникального сочетания методов: голографии, фото- и киносъёмки, теории термоупругости и интегрального эксперимента, что обеспечивает высокую

точность и новизну анализа. Интенсификация теплообмена на природном покрытии превосходит кипение в пленках, большом объеме и сетчатых тепловых трубах.

3. На основе анализа голографических интерферограмм обнаружена нелинейная кривая перемещения частиц. В механизме разрушения к упругому поведению материала добавляется дополнительные аналитическим решением термоупругостной задачи, что позволило уточнить механизм процессов в покрытиях и рассчитывать предельные удельные тепловые потоки и напряжения.

4. Выделена точка отчета в виде остаточной деформации в материале, обнаружена сеть мелких трещин, которые не исчезали при снятии тепловой нагрузки и наблюдались на поверхности. Это позволяет иметь прогноз поведения материалов в случае диссипации энергии у вершины большой трещины и предсказывать состояние прочности. Нелинейность подчеркивает, что к упругому поведению материала добавляется его пластичность, а этот факт мог быть зафиксирован только оптическими методами исследования.

В дальнейшем требуется расширить исследования по другим природным материалам.

Список литературы

1. Genbach A.A., Bondartsev D.Yu., Piralishvili Sh.A. Heat transfer capabilities of coatings made of mineral media. Thermal processes in engineering. – 2025. – Vol. 17. no. 7. – p. 333–343. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185843>
2. Genbach A.A., Bondartsev D.Yu., Genbach N.A., Genbach E.A. Experimental studies of natural material-based coatings for thermal protection of metallic surfaces. Journal of Materials Science: Materials in Engineering. – 2025. – Vol. 20. – P. 46. <https://doi.org/10.1186/s40712-025-00252-5>
3. Chang Y.H., Ferng Y.M. Experimental investigation on bubble dynamics and boiling heat transfer for saturated pool boiling and comparison data with previous works. Applied Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 154. – p. 284-293. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.092>
4. Boubaker R., Platel V. Dynamic model of capillary pumped loop with unsaturated porous wick for terrestrial application. Energy. – 2016. – Vol. 111. – p. 402-413. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.102>
5. Jamialahmadi M. Experimental and theoretical studies on subcooled flow boiling of pure liquids and multicomponent mixtures. International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. – Vol. 51. Iss. 9-10. – p. 2482-2493. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.07.052>

PHASE COMPOSITION OF HYDROGEN STORAGE MATERIALS BASED ON COBALT-MODIFIED LaNi_5

**Skakov M.K.¹, Mukhamedova N.M.¹, Miniyazov A.Zh.^{1,2}, Oken O.¹,
Nassyrova A.K.³**

¹National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

²Shakarim University, Semey, Kazakhstan

³ Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

E-mail: (anar.kenzhebekyzy@mail.ru)

Hydrogen energy is a key area of sustainable energy development, capable of enabling the transition to a low-carbon economy. Unlike traditional carbon-based energy sources, hydrogen energy does not emit CO_2 , and the only byproduct of hydrogen conversion in fuel cells is water [1-3]. This makes hydrogen energy a priority for countries striving to decarbonize industry, transport, and electricity. With the rapid development of hydrogen energy and the growing demand for clean and efficient energy sources, the development of reliable and high-capacity hydrogen storage systems is becoming especially urgent [4-6].

Hydrogen energy is actively developing internationally through national programs and initiatives. In major countries such as Germany [7], Japan [8], and Austria [9], projects are being implemented to develop hydrogen technologies and produce hydrogen. These examples confirm that hydrogen energy has already moved beyond theoretical developments and laboratory experiments. Today, it is becoming part of real industrial solutions, playing a vital role in the global energy transformation and the transition to cleaner and more sustainable energy sources.

One of the strategically important areas of hydrogen energy is the use of hydrogen as an energy storage medium. An additional advantage of hydrogen energy is its ability to act as a long-term energy storage device, smoothing out seasonal and daily fluctuations in generation from renewable sources. Through electrolysis using "green" electricity from solar and wind power plants, hydrogen can effectively accumulate excess electricity during periods of surplus and return it to the grid through reverse conversion in fuel cells or turbogenerators [10-12].

Among various hydrogen storage methods, such as compression, liquefaction, and chemical bonding, solid-phase storage in the form of metal hydrides has attracted particular attention. Metal hydrides exhibit outstanding performance in this regard. In some cases, the hydrogen concentration per unit volume of hydrides is higher than its content per unit volume of liquid hydrogen.

The formation of hydride phases in intermetallic compounds (IMCs) occurs due to the penetration of hydrogen atoms into the interstitial sites of the material's crystal lattice. This mechanism involves the adsorption of hydrogen molecules on the metal surface, their dissociation into atoms, and subsequent penetration into the crystal

lattice, resulting in the formation of a hydride phase at the interface between the metal and the hydride [13-14].

One of the most studied and widely used materials for hydrogen storage is the intermetallic compound LaNi_5 . The LaNi_5 compound exhibits a number of unique properties: relatively low hydriding temperature and pressure, high hydrogen capacity (up to 1.4 wt.%), good absorption and desorption kinetics, and process reversibility [15-16]. Structurally, LaNi_5 belongs to the class of compositions with a hexagonal structure of the AB5 type, where hydrogen occupies interstitial positions, forming the hydride LaNi_5H_6 [17].

However, during this transition, structural defects and dislocations persist, indicating irreversible microstructural damage. These defects, accumulated during cycling, can subsequently affect the degradation of hydrogen absorption properties [18]. To reduce material degradation, alloying and modification of the LaNi_5 matrix with various elements (V, Ni, Al, Mn, Co) is used [19-20].

Cobalt (Co) is one of the most effective elements for modifying the LaNi_5 matrix. Despite the chemical similarity of Co and Ni, their behavior in alloys differs. Co exhibits a lower electron density in the outer levels, making the Co-Ni bond softer. This reduces the alloy's hardness and increases its ductility, which facilitates more effective relief of local stresses and prevents lattice fracture during cyclic deformation [21-22].

Due to the larger atomic radius compared to Ni, modification of Co leads to an increase in the unit cell volume while maintaining the original crystal syngony [22]. This contributes to a decrease in plateau pressure and a reduction in internal stresses in the lattice, since hydride phases are more easily formed in the expanded unit cell [23].

Understanding the influence of Co on the structure and properties of LaNi_5 is key to developing efficient next-generation hydrogen storage systems. This article examines the mechanisms for increasing hydrogen storage efficiency in Co-substituted LaNi_5 systems, as well as changes in the crystal structure through the use of mechanical synthesis, spark plasma sintering (SPS), and subsequent dispersion.

The object of this study is materials based on the intermetallic system LaNi with the addition of Co.

Powders of the starting metals (La, Ni, Co, 99.95% purity) were weighed in stoichiometric proportions of 20%La40%Ni40%Co wt.% and subjected to mechanical synthesis (MS) in a Pulverisette 7 planetary ball mill. The process was carried out in an argon atmosphere at a rotation speed of 350 rpm for 8 hours, using solid steel balls.

Solid laboratory samples were produced using the SPS method on an ISKRA system. The process took place in a vacuum (up to 10^{-3} Pa) at a temperature of $1000 \pm 50^\circ\text{C}$ and a pressure of 30 MPa on the main cross-section for 5 minutes. The resulting sintered samples were cylindrical, 20 mm in diameter, and 5 ± 0.2 mm thick (Figure 1).

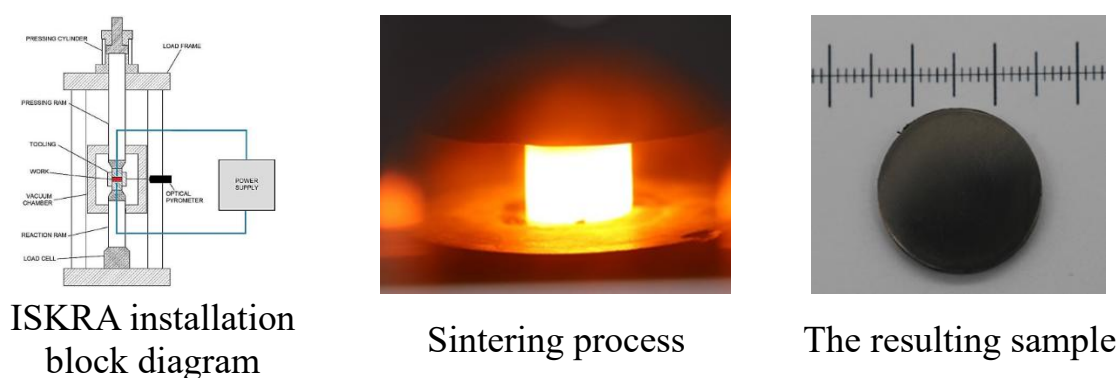


Fig. 1. – Scheme and process of sintering at the ISKRA installation

Subsequent dispersion of the resulting sintered materials was carried out in a ball crusher.

To evaluate the phase composition, the X-ray diffraction method was used using a D6 Phaser diffractometer in monochromatic Cu K α radiation ($\lambda=0.15418$ nm) in the range of angles $2\theta=20$ –90 degrees with a step of $\Delta 2\theta=0.013$ degrees and an exposure time of 23.4 s.

The decoding of diffraction patterns was carried out using a specialized program for processing and searching “DIFFRAC.EVA”, and the PDF-4 Axiom 2025 database was used to identify reflections [24].

The results were determined by X-ray phase analysis and calculated parameters of the crystal lattice and structural characteristics of samples modified with Co after all technological processes affecting the material. Figure 2 shows the superposition of the obtained diffraction patterns of samples LNC-1 and LNC.

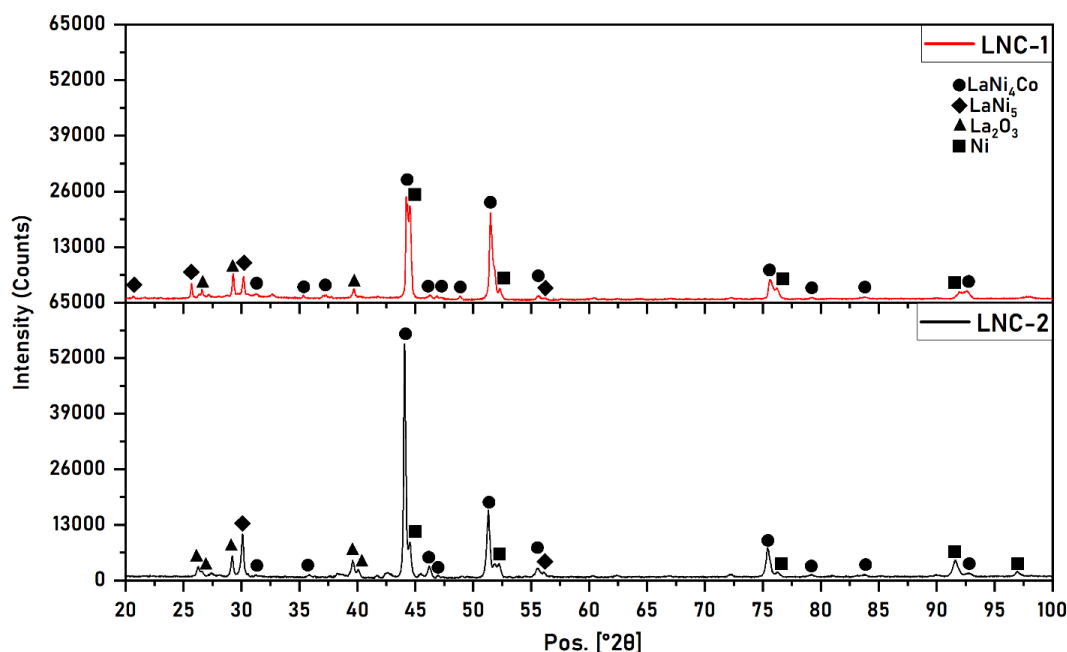


Fig.2. – Overlay of diffraction patterns after dispersion

The diffraction pattern showed that when Co is added to the LaNi₅ matrix phase, one nickel atom is replaced by cobalt, which subsequently forms the LaNi₄Co phase. This substitution is possible due to the close atomic radii and similar electron configuration of Ni and Co, which allows the latter to isomorphically enter the structure without significant distortion of the crystal lattice. Comparison of the diffraction patterns shows that the peaks of the LNC-1 sample have lower intensity compared to LNC-2, which indicates a higher level of defects and lattice distortions. In both samples, the corresponding LaNi₅ phase has an extended lattice parameter along the c axis ($a = 5.01430 \text{ \AA}$, $c = 3.97987 \text{ \AA}$; PDF 04-008-6308). This phase is characterized by a high level of microdeformation, which leads to a simultaneous decrease in intensity and broadening of the peaks. [25]. Since the starting material was obtained by mechanosynthesis, the process of solid-phase interaction was accompanied by intense diffusion of Co atoms and their partial replacement of Ni atoms in the structure of the LaNi₅ phase [22].

Acknowledgments.

This work was supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under program-targeted funding project BR21882200, «Development and Research of Innovative Technologies, Materials, and Devices for the Production, Storage of Hydrogen, and Electric Power Generation».

List of literature

- 1 Sahak, M.Z.M.; Shaffee, S.N.A.; Thant, M.M.M.; Aminuddin, F.A.; Rawat, D.; Calzadilla, P.A.F.; Krishnan, R.K.; Saiffudin, N. Advancement in green hydrogen production: Integrating Solid Oxide Electrolysis Cells (SOECs) into existing offshore facilities for sustainable energy. In Proceedings of the APOGCE 2024, Perth, Australia, 15-17 October 2024. <https://doi.org/10.2118/221154-MS>.
- 2 Das, H.S.; Chowdhury, M.F.F.; Li, S.; Tan, C.W. Fuel cell and hydrogen power plants. In Hybrid Renewable Energy Systems and Microgrids; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2021; pp. 313-349. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821724-5.00009-X>.
- 3 Sikiru, S.; Oladosu, T.L.; Amosa, T.I.; Olutoki, J.O.; Ansari, M.N.M.; Abioye, K.J.; Rehman, Z.U.; Soleimani, H. Hydrogen-powered horizons: Transformative technologies in clean energy generation, distribution, and storage for sustainable innovation. Int. J. Hydrogen Energy 2024, 56, 1152-1182. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.186>.
- 4 Moradi, R.; Growth, K.M. Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. Int. J. Hydrogen Energy 2019, 44, 12254–12269. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.041>.
- 5 Sadeq, A.M. Advances and Challenges in Hydrogen Energy: A Review. Chem. Eng. Process Tech 2024, 9, 1087.

- 6 Kyriakopoulos, G.L.; Aravossis, K.G. Literature Review of Hydrogen Energy Systems and Renewable Energy Sources. *Energies* 2023, 16, 7493. <https://doi.org/10.3390/en16227493>.
- 7 National Hydrogen Strategy Update, NHS, July 2023, https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/national-hydrogen-strategy-update.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- 8 The world's largest-class hydrogen production, Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R) now is completed at Namie town in Fukushima. March 7, 2020, New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO). https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100422.html.
- 9 H2FUTURE, Green hydrogen pilot plant at industrial scale, energy innovation austria 1/2020. <https://www.energy-innovation-austria.at/article/h2future-2/?lang=en>.
- 10 Paul A. Kempler, John J. Slack, Andrew M. Baker, Research priorities for seasonal energy storage using electrolyzers and fuel cells, *Joule*, Volume 6, Issue 2, 2022, Pages 280-285, ISSN 2542-4351, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.12.020>.
- 11 Ivalin Petkov, Paolo Gabrielli, Power-to-hydrogen as seasonal energy storage: an uncertainty analysis for optimal design of low-carbon multi-energy systems, *Applied Energy*, Volume 274, 2020, 115197, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115197>.
- 12 Kwon, K.; Lee, H.-B.; Kim, N.; Park, S.; Joshua, S.R. Integrated Battery and Hydrogen Energy Storage for Enhanced Grid Power Savings and Green Hydrogen Utilization. *Appl. Sci.* 2024, 14, 7631. <https://doi.org/10.3390/app14177631>.
- 13 Martin, M., Gommel, C., Borkhart, C., & Fromm, E. (1996). Absorption and desorption kinetics of hydrogen storage alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 238(1-2), 193-201. [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(96\)02217-7](https://doi.org/10.1016/0925-8388(96)02217-7).
- 14 Dematteis E.M., Barale J., Corno M., Sciullo A., Baricco M., Rizzi P. Solid-State Hydrogen Storage Systems and the Relevance of a Gender Perspective // *Energies*. - 2021. - Vol. 14, Is. 19, <https://doi.org/10.3390/en14196158>
- 15 Sandrock G. A panoramic overview of hydrogen storage alloys from a gas reaction point of view // *Journal of Alloys and Compounds*. 1999. Vol. 293. P. 877–888. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(99\)00384-9](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(99)00384-9).
- 16 Zhang Y., Zhao D., Li B. et.al Hydriding and dehydriding characteristics of nanocrystalline and amorphous $Mg_{20-x}La_xNi_{10}$ ($x=0-6$) alloys prepared by melt-spinning. 2009. Vol. 27. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(08\)60280-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(08)60280-X).
- 17 Du H. et al. Neutron powder diffraction study on the structures of $LaNi_5-(x)Al(x)D(y)$ compounds // *Solid State Communications*. 2003. Vol. 128. [https://doi.org/10.1016/S0038-1098\(03\)00655-0](https://doi.org/10.1016/S0038-1098(03)00655-0).
- 18 Huang Tao, Yu Hewu. An X-ray diffraction study on phase transition lattice gas in $LaNi_5H_x$ // *Journal of the Less-Common Metals*. – 1989. – Vol. 153. – P. 253–257. – [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(89\)90119-7](https://doi.org/10.1016/0022-5088(89)90119-7).
- 19 Chen, J., Dou, S. X., & Liu, H. K. (1996). Effect of partial substitution of La with Ce, Pr and Nd on the properties of $LaNi_5$ -based alloy electrodes. *Journal of Power Sources*, 63(2), 267–270. [https://doi.org/10.1016/s0378-7753\(96\)02461-5](https://doi.org/10.1016/s0378-7753(96)02461-5).

20 Elki C. Souza, Edson A. Ticianelli. Effect of partial substitution of nickel by tin, aluminum, manganese and palladium on the properties of LaNi₅-type metal hydride alloys. J. Braz. Chem. Soc. 14 (4), Aug 2003. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532003000400009>.

21 Liu, J., Zhu, S., Zheng, Z., Cheng, H., Yan, K., & Zhu, Z. (2019). Long-term hydrogen absorption/desorption properties and structural changes of LaNi₄Co alloy with double desorption plateaus. Journal of Alloys and Compounds, 778, 681–690. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.164>.

22 Zhida Zhu, Shuai Zhu, Haoqi Lu, Jie Wu, Kai Yan, Honghui Cheng, Jingjing Liu, Stability of LaNi₅-xCo_x alloys cycled in hydrogen – Part 1 evolution in gaseous hydrogen storage performance, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 44, Issue 29, 2019, Pages 15159-15172, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.111>.

23 Fadonougbo, J.O. AxBy Intermetallics for hydrogen storage. Encyclopedia. Available online: <https://encyclopedia.pub/entry/6511> (accessed on 18 August 2025).

24 International Centre for Diffraction Data (ICDD). PDF-4 Axiom, 2025; ICDD: Newtown Square, PA, USA. Available online: <https://www.icdd.com/pdf-4-axiom/> (accessed on 1 August 2025).

25 Deb, A. K., & Chatterjee, P. (2019). Study of deformation microstructure of nickel samples at very short milling times: effects of addition of α -Al₂O₃ particles. Journal of Theoretical and Applied Physics. <https://doi.org/10.1007/s40094-019-0319-2>.

УДК 536.421.1; 622.245.5 (088.8)

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОРОШКОВ ИЗ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ

Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю.*, Сабитов А.

Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Дукеева, г. Алматы,
Казахстан

* e-mail: d.bondartsev@aes.kz

1 Введение

Природные материалы, такие как туфы [1], мраморы [2], кварциты [3], граниты [4], тешениты [5] и бентониты [6], имеют огромный потенциал для применения в высокотемпературных и высокоинтенсивных условиях, особенно в такой области как теплоэнергетика [7]: системы охлаждения [8-9] и тепловая защита [10]. Эти материалы давно изучаются и применяются в различных отраслях возобновляемых источниках энергии, строительства, инжиниринга, машиностроения, материаловедения, но их использование в качестве покрытий

для теплоэнергетического оборудования является относительно новым и перспективным направлением [5].

Современные порошковые материалы не только способны значительно улучшить термостойкость и эффективность работы систем, но и обеспечивают высокую степень защиты от тепловых повреждений, что, в свою очередь, способствует увеличению надежности и продлению срока службы оборудования. Развитие новых технологий и методов обработки природных материалов открывает новые горизонты для их применения в самых различных сферах промышленности.

Весьма актуально проводить научные исследования теплообмена в капиллярно-пористых природных материалах. В качестве таких материалов выбираются горные породы: туфы [1], мраморы [2], кварциты [3], граниты и тешениты [5]. Из них изготавливаются порошки и наносятся напылением на подложку. На основе физической модели в реальной капиллярно-пористой структуре записываются уравнения теплопроводности термоупругой задачи [7]. Решение проводится для предельных величин тепловых потоков плавления $q_{пл}$, сжатия $q_{сж}$ и растяжения $q_{раст}$, вызывающих соответствующие термические напряжения σ [5]. Модель проверяется экспериментом с использованием скоростной киносъемки образующихся частиц (шелушки) СКС-1М.

Ранее построена научная методика исследования [7] с проведением интегрального эксперимента [5] для испытания девяти камер сгорания термоинструмента, который предназначен для обработки естественных минеральных сред. Для понимания природы разрушения использована скоростная киносъемка.

Наряду с изучением природных капиллярно-пористых покрытий на предмет их предельного состояния $q_{пред}$, $\sigma_{пред}$ [5] производятся исследования кризиса теплообмена кипением в капиллярно-пористых структурах металлургических сеток [7]. Строится физическая модель кипящего потока с учетом совместного действия капиллярных $\Delta P_{кап}$ и массовых $\Delta P_{кап+г}$ сил с избытком $m_{ж}/m_{п}$. Механизм процесса теплообмена познается с помощи голографической интерферометрии и скоростной киносъемки. Определяются критические удельные тепловые потоки $q_{кр}$ для разных давлений P через интегральные и термогидравлические характеристики.

Предлагается создать технологию нанесения напылением порошков природных материалов (факелы, дробление материалов).

2 Материалы и методы исследования

Технология приготовления порошков из минеральной среды. Порошки из природного материала (кварциты, граниты, тешениты, мраморы, туфы) приготавливались после обработки массива горелкой ракетного типа [5].

Другой способ получения порошков заключался в приготовлении специальных форм из необходимого материала и их взрывания, что позволяло применять упрочняющие технологии для создания покрытий. С этой целью

производились исследования моделей из песчано-цементной смеси, представляющих собой замкнутый объём, ограниченный в одном случае системой сопряженных эллиптических поверхностей, в фокусах которых расположены шпуров (модель №1), в другом случае ограниченный прямолинейными свободными поверхностями (модель №2) см. рис. 1.

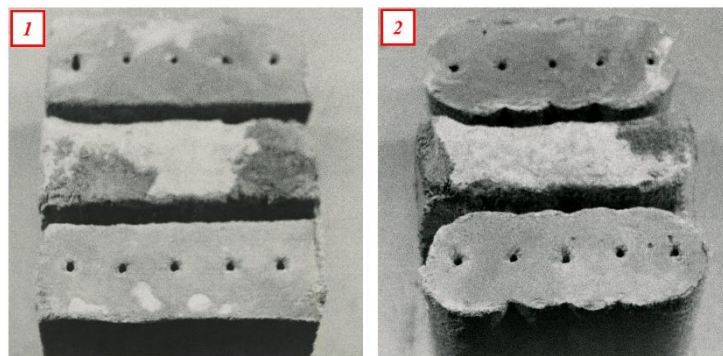


Рис. 1. - Общий вид моделей: 1 – модель с эллиптическими свободными поверхностями; 2 – модель с прямолинейными свободными поверхностями.

Модель №1, изображенная на рис. 1 состояла из четырех сопряженных эллиптических цилиндров с эксцентриситетом 0.47, в фокусах которых располагались шпуров диаметром $d_{ш} 5 \times 10^{-3}$ м глубиной $h 50 \times 10^{-3}$ м.

Размер среднего куска рассчитывался по формуле:

$$d_{cp} = \frac{\sum_1^n d_i \times w_i}{\sum w_i},$$

где d_i – средний размер i – ой фракции, мм; w_i – выход i – ой фракции, %.

На рис. 2 представлено распределение по фракциям гранулометрического состава. Фракции, расположенные: 1 – для модели с эллиптической свободной поверхностью, а фракции 2 – для модели с прямолинейной свободной поверхностью.

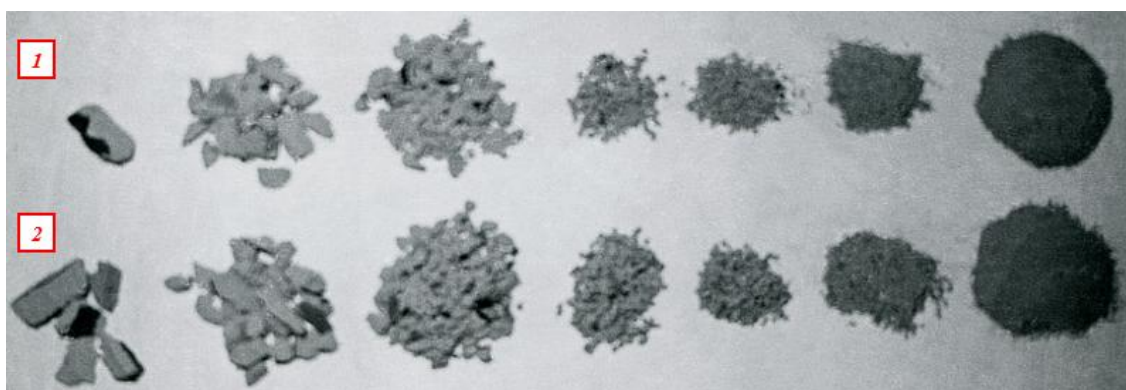


Рис. 2. - Общий вид распределения по фракциям массы моделей №1 (1) и №2 (2)

Величина суммарной вновь образованной поверхности:

$$S_n = \frac{6}{\gamma} \sum_1^n \frac{P_i}{d_i} - S_0,$$

где n – число фракций; P_i – вес каждой фракции, г; γ – удельный вес материала, г/см³; S_0 – первоначальная поверхность модели, см².

Результаты ситового анализа гранулометрического состава показывают, что для модели №1 (см. рис. 1) выход отдельных классов от 0 до 2×10^{-3} м составил 12.5%, а для модели №2 (см. рис. 3) – 8.6 %. Кроме того, возрастает степень упрочнения частиц порошка.

Для проведения экспериментов по влиянию эксцентриситет эллиптических цилиндров на качество дробления (см. рис. 3, рис. 4: 3 – для Модели №3, 4 – для Модели №4) выбирались две модели: модель №3: $\varepsilon = 0.74$, модель №4: $\varepsilon = 0.47$.

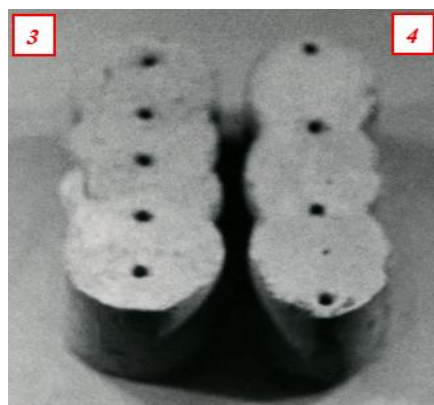


Рис. 3. - Общий вид моделей: 3 - модель с эксцентриситетом 0.74;
4 – модель с эксцентриситетом 0.47.

Результаты ситового анализа гранулометрического состава показали, что для модели №3 (см. рис. 4) выход класса $(0 \div 2) \times 10^{-3}$ м дает 27.2%, а для модели №4 – 18.2%. Данная технология позволяет увеличивать степень упрочнения порошка.

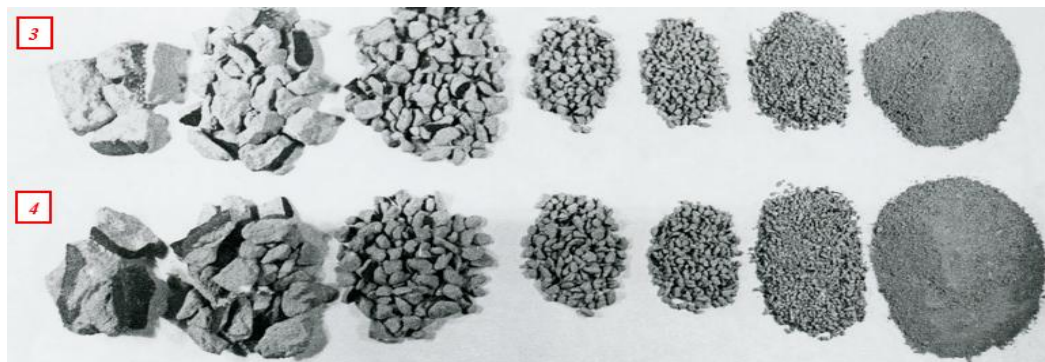


Рис. 4. - Общий вид распределения по фракциям
массы моделей №3 (3) и №4 (4)

Для напыления порошка частицы отбирались по крупности: 0.1×10^{-3} м – 3.1%; 0.25×10^{-3} м – 4.2%; 0.5×10^{-3} м – 7.3%.

Эксцентриситет эллипса:

$$\varepsilon = \frac{c}{a},$$

где $2c$ – расстояние между фокусами; $2a$ – длина большой оси. Высота эллиптических цилиндров $h = 95 \times 10^{-3}$ м.

Упрочняющая технология производства порошков получается за счет разрушения энергии взрыва в фокусе эллиптического цилиндра на энергию сжатых газов и энергию волны. Происходит синергический эффект суммирования этих энергий в каждом из фокусов цилиндра. Термические напряжения сжатия частиц порошка возрастали до двух раз [5].

Факелы для напыления покрытий нанесением порошка минеральной среды. Используются детонационные высокотемпературные пульсирующие двухфазные факелы керосино-кислородного термоинструмента, позволяющие дожигать горючее на поверхности покрытия с $\alpha = 0.6 \div 0.8$ (см. рис. 5). Это позволяет существенно увеличить удельные тепловые потоки q при небольшом перегреве ΔT покрытия, которые могут быть до шести раз выше по сравнению с обычным процессом сжигания. Максимальные q на покрытии достигали величины $(2 \div 15) \times 10^6$ Вт/м². Зарегистрирована структурная спиновая детонация факела (восемь участков), см. рис. 5, А. На рис. 5, В представлена структурная спиновая детонация факела с вздутием струи на конечном участке.

Поперечная скорость участка воспламенения спинового детонационного факела (см. рис. 5, С) определяется из наклона к образующей спирального следа. Поскольку угол наклона близок к 45 градусам, то поперечная скорость вдвое превышает скорость звука в газовой струе. На рис. 5, А эта волна сделала восемь полных оборотов. За счет системы управления термоинструментом регулировалась длина детонационной струи, истекающей из сопла (см. рис. 5, D). Спиновая детонация позволяет получать удельные тепловые потоки в два-шесть раз больше, чем при напылении при той же температуре факела на покрытии (см. рис. 5, E). Это дает возможность напылять порошки крепких малопористых пород без оплавления (см. рис. 5, F), а для высокопористых пород (например туф) – производить напыление с оплавлением покрытия.

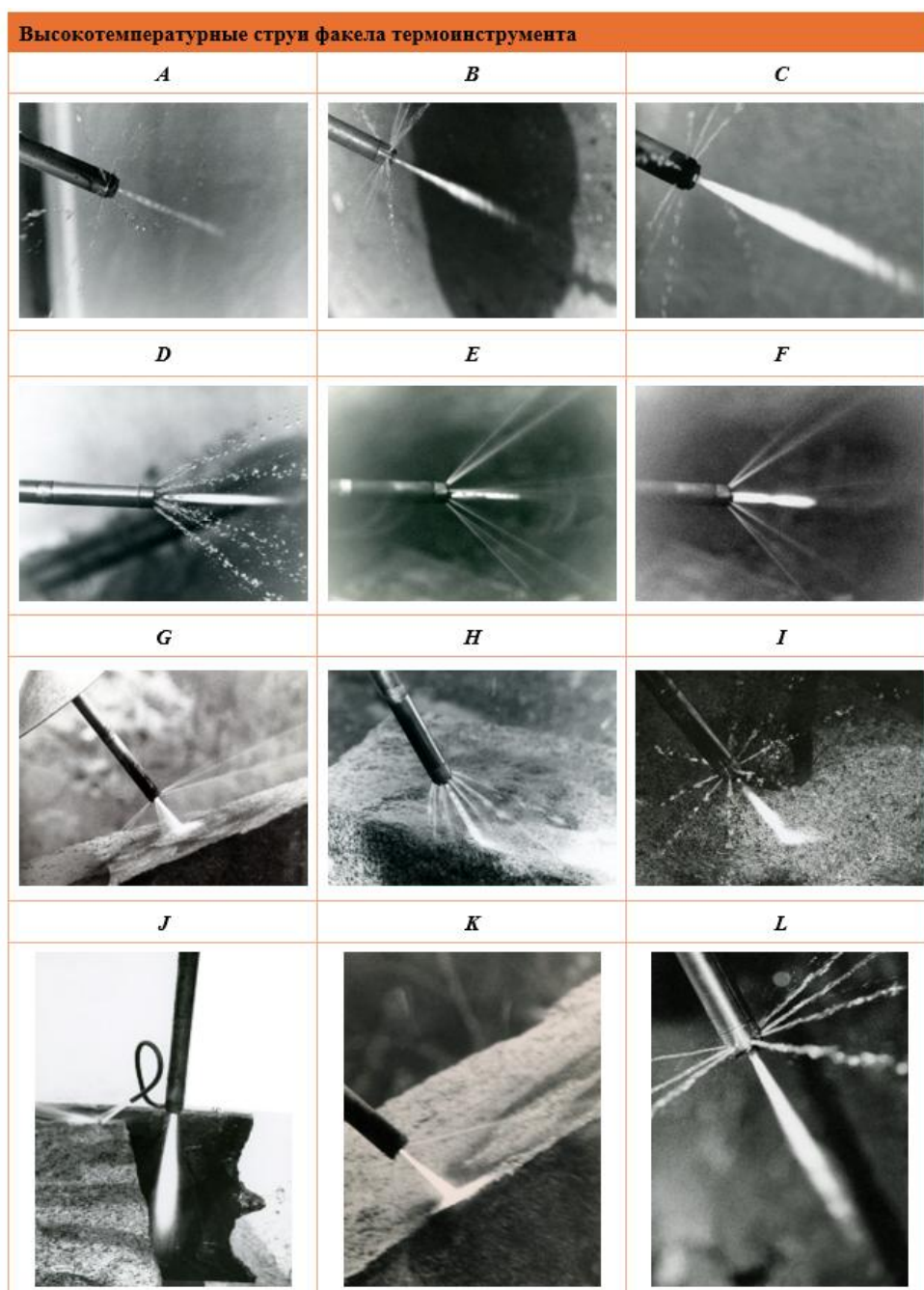


Рис. 5. – Вид детонационных, пульсирующих, сверхзвуковых, двухфазных высокотемпературных факелов (струй) термоинструмента

На рисунке 5, *G*, *H*, *I* показано взаимодействие детонационного факела с поверхностью. Автоматическая система управления устанавливает оптимальное расстояние струи от среза сопла до покрытия см. рис. 5, *G*. Формируется оптимальное пятно растекания струи см. рис. 5, *H* с установкой угла оси горелки к покрытию см. рис. 5, *I*. Выброс струй воды имеет технологическое значение для формирования покрытия.

Процесс дожигания горючего (керосина) протекает устойчиво на покрытии (см. рис. 5, *G*), непрерывно и наблюдается за ударной волной (см. рис. 5, *H*), а

периодичность воспламенения связана с отрывом горения газа от фронта ударной волны (см. рис. 5, *Л*).

Частота колебаний давления на покрытии составляла около 200 Гц, процесс напыления протекал стабильно (см. рис. 5, *Л*). Температура струи находилась в пределах $(3000 \div 850)^\circ\text{C}$, радиус струи $r_a = 3 \times 10^{-3}$ м, $r_c = 10 \times 10^{-3}$ м.

В целом, стабилизация горения пульсирующих волн имеет место за счет торможения газа на капиллярно-пористом покрытии в виде сверхзвукового потока смеси (см. рис. 5, *К*), аналогично процессам в ударных трубах.

На рисунке 5, *Л* представлена структура затопленной струи вдоль абсциссы z , истекающей из сопла с критическим диаметром 4×10^{-3} м. Зарегистрировано явление спиновой детонации в конце факела струи. Струя истекала с высоким уровнем шума и резкими звуковыми колебаниями. Охлаждающаяся вода струйками отводится из калибратора термоинструмента с целью обеспечения технологии напыления.

Из исследованных горных пород гранит имеет низкое значение $\lambda = (2.2 \div 4.1)$ Вт/(м $\times$ К), а значение $\alpha = (0.6 \div 0.9) \times 10^{-5}$ К $^{-1}$. Если будут иметь иные случаи, то можно воспользоваться быстрым охлаждением покрытия, которое быстро будут затвердевать с получением реакционно-отверждаемых покрытий (см. рис. 5, *К*).

3 Результаты и их обсуждение

Зависимость предельных тепловых потоков q , вызывающих напряжения σ сжатия, растяжения и оплавления различных природных материалов, представлены в работах [5]. Определены различные толщины отрывающихся частиц (шелушек) покрытий в зависимости от времени τ подачи теплового потока. Экспериментальное подтверждение проведено за счет скоростной киносъемки СКС-1М, когда определялось время процесса τ и размер оторвавшейся частицы δ .

Предельная область работы тепловых нагрузок для капиллярно-пористых покрытий из естественных (природных) материалов, не имеющих оплавления поверхности, для поддерживаемого перегрева покрытия $\Delta T = T_{\text{ст}} - T_{\text{н}} = (20 \div 75)$ К, дает следующие величины: для тешенитных покрытий – $(2.2 \div 4) \times 10^6$ Вт/м ^{2} ; для гранитных покрытий – $(4 \div 6.2) \times 10^6$ Вт/м ^{2} ; для кварцевых покрытий – $(6.2 \div 15) \times 10^6$ Вт/м ^{2} . Полученные области q значительно превосходят такие высокофорсированные системы, как кипение в тонких пленках [8] и в большом объеме [9], кипение в сетчатых фитилях тепловых труб [10].

Рассмотрим взаимодействие сверхзвуковой струи термоинструмента (см. рис. 5, *D, E, F*) с преградой в зоне торможения (окрестность критической точки) (см. рис. 5, *G, H, Л*). Струя расположена ортогонально (перпендикулярно) к поверхности покрытия (см. рис. 5, *Л*).

При взаимодействии струи с преградой (сверхзвуковой, так и дозвуковой) имеет место совместное действие высокой интенсивности турбулентности, отрицательного градиента давления и волновой структуры, которая порождает турбулентность (пульсации), вызывает отрыв потока от стенки. Такая струя

относится к типу импактных, влияет и воздействует на механизм теплопередачи на пятне торможения покрытия (см. рис. 5, К). Она увеличивает турбулентность (пульсации), а в случае кипящей системы охлаждения разрушает паровые конгломераты.

Запишем для «стандартных условий» уравнение теплопередачи в ламинарном пограничном слое при продольном обтекании пластины:

$$Nu_x = K_1 \sqrt{Re_x} \sqrt[3]{Pr}, \quad (1)$$

где $Re_x = W_\infty \cdot \frac{x}{\nu}$, $W_\infty = W_0$.

Локальная теплопередача при продольном обтекании пластины в турбулентном пограничном слое [66]

$$Nu_x = K_2 \cdot Re_x^{0.8} \cdot Pr^{0.43}, \quad (2)$$

где $T_{ст} = const$; $10^5 < Re_x < 10^7$.

В формуле (1) $K_1 = 0.323$; в формуле (2) $K_2 = 0.0296$.

Теплофизические свойства газа принимаются при средней температуре между T_∞ и $T_{ст}$; чаще в моделях за определяющую температуру выбирается температура невозмущенного потока T_∞ , либо $T_{ст}$;

$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ – критерий Прандтля;

Nu_x – число Нуссельта

$$Nu_x = \alpha_x \cdot \frac{x}{\lambda}.$$

Перепишем число Nu_x и критерий Re_x в более удобной форме для анализа.
Критерий Рейнольдса

$$Re_x = \frac{\rho_0 \cdot W_0 \cdot x}{\mu_x}.$$

Число Нуссельта

$$Nu_x = \frac{q(x) \cdot x}{\lambda_x \cdot (T_{a_{ст}} - T_{ст})}.$$

Рассчитаем температуру T_{a_w}

$$T_{a_{ст}} = Tr_\infty, K, \quad (3)$$

где Tr_∞ – температура восстановления, равная

$$Tr_\infty = T'_\infty + r \cdot \frac{W_\infty^2}{2cp_\infty}, K; \quad (4)$$

T'_∞ – термодинамическая температура невозмущенного потока (это такая температура, которую показал бы термометр, перемещающийся вместе с потоком с одинаковой с ним скоростью).

Для $Pr = 1$:

$$T_{0\infty} = T'_\infty + r \cdot \frac{W_\infty^2}{2cp_\infty}, K, \quad (5)$$

$Ta_{\text{ст}}$ – температура самого покрытия или адиабатная температура стенки (температура идеально изолированной, неизлучающей твердой поверхности, обтекаемой потоком газа с внутренними источниками теплоты или с выделением теплоты вследствие диссипации энергии). При $Pr < 1$, $Ta_{\text{ст}} < T_{0\infty}$.

Коэффициент восстановления

$$r = \frac{Ta_{\text{ст}} - T'_{\infty}}{T_{0\infty} - T'_{\infty}}. \quad (6)$$

Для ламинарных слоев

$$r = \sqrt{Pr}. \quad (7)$$

Термодинамическая температура T'_{∞} равна

$$T'_{\infty} = \frac{\alpha_{\infty}^2}{K \cdot R}, \text{ К}. \quad (8)$$

Температура торможения

$$T_{0\infty} = T_{\infty} \cdot \left[1 + \frac{(K-1)}{2} \cdot M_{\infty}^2 \right], \text{ К}. \quad (9)$$

Температура восстановления равна:

$$T_{r\infty} = T_{\infty} \cdot \left[1 + r \cdot \frac{(K-1)}{2} \cdot M_{\infty}^2 \right], \text{ К}, \quad (10)$$

где $K = \frac{c_p}{c_v}$.

Расчет удельных тепловых потоков $q_{\text{ст}}$. Тепловой поток омываемого высокоскоростным потоком газа, определяется как:

$$q_{\text{ст}} = \alpha \cdot (Ta_{\text{ст}} - T_{\text{ст}}), \text{ Вт/м}^2. \quad (11)$$

Если $Pr \neq 1$, то

$$Ta_{\text{ст}} = T_{r\infty}, \quad (12)$$

и $q_{\text{ст}} = \alpha \cdot (T_{r\infty} - T_{\text{ст}}), \text{ Вт/м}^2$.

Если $Pr = 1$, то

$$Ta_{\text{ст}} = T_{0\infty}, \quad (13)$$

и $q_{\text{ст}} = \alpha \cdot (T_{0\infty} - T_{\text{ст}}), \text{ Вт/м}^2$.

Для детонационного сверхзвукового факела эксперименты нами проводились с применением микронасадки для измерения полного и статического давлений и датчика теплового потока для измерения $q(x)$, α_x , M_x и $\rho_0 W_0$ в растекающейся струе.

Числа Маха $M = \frac{W_a}{\alpha} = 2.3$.

Степень нерасчетности истечения (см. рис. 27) $n_a = \frac{P_e}{P_b} = 0.8$.

Число Re_a рассчитывалось по параметрам газа на срезе сопла (индекс «а»)

$$Re_a = \frac{w_a \cdot d_a}{\nu_a},$$

где $Re = 1 \cdot 10^6$; $\bar{l} = \frac{l}{d_a} = 3$.

В окрестностях критической точки (на покрытии) предполагается ламинарный режим течения, так как число Re_x не высокое и действует отрицательный градиент давления. Однако, число Nu_x согласно эксперименту в $(5 \div 6)$ раз выше, чем дает ламинарная теория (формула (1)). Возможно, проявляется детонационный эффект проникновения в ламинарный пограничный слой турбулентных пульсаций из внешнего течения. При $Re_x \geq 4 \cdot 10^5$ точки располагаются ниже линии согласно формуле (2), т.е. закона турбулентного теплообмена для дозвуковых течений.

Таким образом, для «стандартных условий» теплообмена $K_1 = 0.323$ и $K_2 = 0.0296$. В случае детонационной сверхзвуковой волны, имеем для $Re_x < 4 \cdot 10^5$, $K'_1 = (5 \div 6) \cdot K_1$ и для $10^6 \geq Re_x \geq 4 \cdot 10^5$, $K'_2 = 0.95 \cdot K_2$.

Заключение

Исследован процесс создания покрытий из природных материалов - гранита, кварцита, тешенита, мрамора и туфа:

1. Создана новая технология изготовления порошков с помощью управления энергией волны и газов в фокусах эллиптических цилиндров, что позволило провести упрочнение материала и повысить выход мелких фракций природных материалов в диаметре гранулометрического состава $(0 \div 2) \times 10^{-3}$ м.

2. Эффективное и управляемое напыление покрытий из различных природных материалов получено за счет динамических характеристик детонационного факела термоинструментов. Выявлены основные параметры покрытий и исследованы пути управления процессами напыления.

3. Система охлаждения показала высокую эффективность вплоть до критического состояния металла камер сгорания и сопел (5×10^6 Вт/м²).

4. Построена модель взаимодействия осесимметричной сверхзвуковой детонационной струи газов термоинструмента по нормали к покрытию, а коэффициенты теплоотдачи согласно эксперименту в $(5 \dots 6)$ раз выше, чем дает ламинарная теория и на несколько процессов ниже, чем для закона турбулентного теплообмена.

5. Разработанные поверхности в виде покрытий и сетчатых структур дают положительный эффект за счет преимущества совместных технологий их изготовления с расширением отводимых тепловых нагрузок и управления состоянием покрытий.

Список литературы

1. Ting Zuo, Xianglong Li, Jianguo Wang, Qiwen Hu, Zihao Tao, Tao Hu. Insights into natural tuff as a building material: Effects of natural joints on fracture fractal characteristics and energy evolution of rocks under impact load. Engineering Failure Analysis. – 2024. – Vol. 163. – P. 108584.

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108584>

2. Yan Zhang, Chunchi Ma, Yaohui Gao, Kai Meng. Investigation on mechanical behaviors and energy characteristics of deep-buried marble in a hydraulic tunnel in Southwest China. *Transportation Geotechnics*. – 2024. – Vol. 47. – P. 101270.

<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101270>

3. Wei Chen, Wuwen Liu, Yue Liang. An Investigation into the Compressive Strength, Permeability and Microstructure of Quartzite-Rock-Sand Mortar. *Fluid Dynamics and Materials Processing*. – 2023. – Vol. 20. Iss. 4. – p. 859-872.

<https://doi.org/10.32604/fdmp.2023.029310>

4. Ju Wang, Feng Dai, Yi Liu, Hao Tan, Pan Zhou. Thermophysical-mechanical behaviors of hot dry granite subjected to thermal shock cycles and dynamic loadings. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.09.007>

5. Genbach A.A., Bondartsev D.Yu., Genbach N.A., Genbach E.A. Experimental studies of natural material-based coatings for thermal protection of metallic surfaces. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*. – 2025. – Vol. 20. – P. 46.

<https://doi.org/10.1186/s40712-025-00252-5>

6. Askalany Ahmed A, et al. High potential of employing bentonite in adsorption cooling systems driven by low-grade heat source temperatures. *Energy*. – 2017. – Vol. 141. – P. 782e91. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.171>

7. Genbach A.A., Bondartsev D.Yu., Piralishvili Sh.A. Heat transfer capabilities of coatings made of mineral media. *Thermal processes in engineering*. – 2025. – Vol. 17. no. 7. – p. 333–343. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185843>

8. Chang Y.H., Ferng Y.M. Experimental investigation on bubble dynamics and boiling heat transfer for saturated pool boiling and comparison data with previous works. *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – Vol. 154. – p. 284-293.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.092>

9. Boubaker R., Platel V. Dynamic model of capillary pumped loop with unsaturated porous wick for terrestrial application. *Energy*. – 2016. – Vol. 111. – p. 402-413. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.102>

10. Jamialahmadi M. Experimental and theoretical studies on subcooled flow boiling of pure liquids and multicomponent mixtures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2008. – Vol. 51. Iss. 9-10. – p. 2482-2493.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.07.052>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССОВОЙ ДОЛИ ВЛАГИ В СОЕВОЙ ОКАРЕ

Садықова А.Қ.^{1*}, Ниязбаев А.К.²

¹ Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы, Казахстан

² Казахский национальный аграрный исследовательский университет, г. Алматы, Казахстан

* e-mail: ai.sadykova@aes.kz

1 Введение

Определение содержания влаги в материале является важным параметром при исследовании различных веществ, включая высокобелковые растительные компоненты, такие как соевая окара. Соевая окара – побочный продукт переработки соевых бобов после их отжима – содержит значительное количество белка и других питательных веществ, что делает её ценным сырьём для пищевой и кормовой промышленности [1,2,3,4]. Содержание растительного белка, клетчатки и полезных липидов в соевой окаре варьируется от 22% до 27%, что придаёт продукту питательную ценность и делает его востребованным [5,6]. Из-за высокого содержания влаги (80-85%) в свежей соевой окаре и её ограниченного срока хранения (не более 120 часов при температуре 4 ± 2 °C) необходимо использовать различные методы для продления срока годности [7,8]. Точное определение влажности соевой окары важно для оценки её питательных свойств и разработки эффективных методов хранения и переработки. Цель исследования заключается в сравнении двух методов для определения массовой доли влаги в образцах окары: традиционного метода сушки до постоянной массы и метода с использованием влагомера «Sartorius», а также в оценке точности и удобства этих методов для измерения влажности в высокобелковом растительном материале. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: выбор необходимого оборудования и приборов для измерения массовой доли влаги; разработка методики проведения экспериментов; выполнение опытов и анализ полученных данных.

2 Методы исследования

Для определения массовой доли влаги в соевой окаре были применены два метода. Первый метод основан в сушке образцов до достижения постоянной массы. Данный способ считается наиболее точным, поскольку процесс сушки продолжается до полного удаления влаги, в отличие от ускоренных методов, где сушка ограничена временем.

Исследования проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 31388-2009 «Продукты соевые пищевые. Технические условия» и ГОСТ 21904-75 «Хлеб и хлебобулочные изделия. Метод определения влажности».



1 – термометр; 2 – сушильный шкаф; 3 – бюксы; 4 – весы высокоточные; 5 – весы для взвешивания общей массы продукта

Рис. 1. – Приборы для исследования

Оборудование, используемое для исследования: сушильный шкаф с максимальной температурой нагрева не ниже 150 °С, который поддерживает заданную температуру с погрешностью ± 2 °С; лабораторные весы общего назначения по ГОСТ 24104 с высокой точностью и допускаемой погрешностью $\pm 2,00$; металлические бюксы с крышками.

Пять предварительно охлажденных до комнатной температуры пустых бюксов взвешиваются на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. В каждый из бюксов помещают по 10 г тщательно измельченного исследуемого материала с точностью до 0,0001 г, затем закрывают крышками и снова взвешивают.

Открытые бюксы с исследуемым материалом помещают в сушильный шкаф, при этом крышки высушиваются вместе с бюксами. Сушка осуществляется при температуре 100-105 °С. После истечения первого часа сушки бюксы закрывают крышками и взвешивают. Затем бюксы с открытыми крышками вновь помещают в сушильный шкаф на один час. После охлаждения проводят взвешивание, и при необходимости бюксы снова ставят в сушильный шкаф. При необходимости процесс повторяют до тех пор, пока результаты двух последовательных взвешиваний не будут совпадать, что свидетельствует о достижении постоянной массы. Допустимое расхождение между параллельными результатами не должны превышать 0,2 %.

Расчет массовой доли влаги данным методом проводят по формуле:

$$W = \frac{(m_1 - m_2)}{m} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где m_1 - масса образца до высушивания (с бюксом), г;

m_2 - масса образца после высушивания (с бюксом), г;

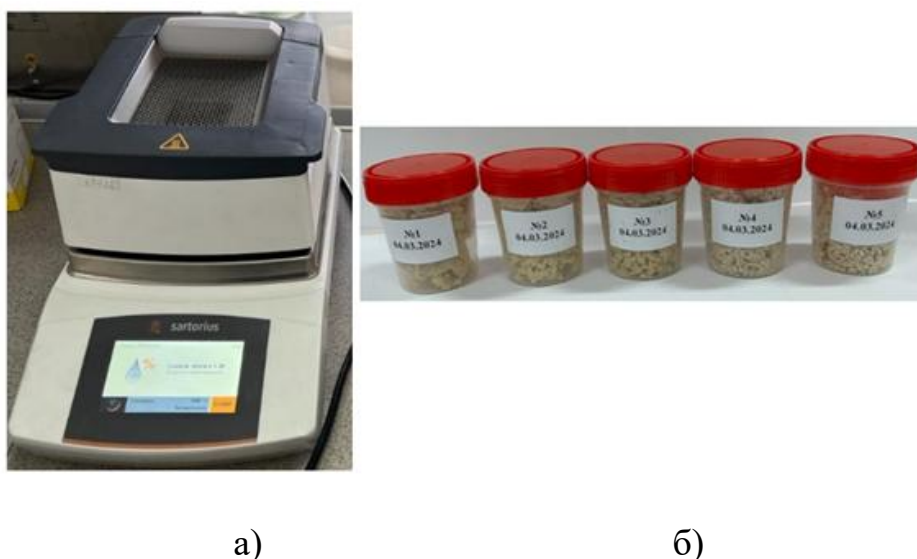
m – масса навески (соевой окары), г.

Второй метод определения массовой доли влаги в образцах соевой окары основан на применении анализатора влажности «Sartorius», который работает по принципу термогравиметрического анализа. Для проведения измерений

небольшой образец окары помещается на специальную чашу, установленную на высокоточном весовом модуле прибора. После этого образец подвергается нагреву до заданной температуры, обычно 105°C, что приводит к испарению влаги из материала.

В процессе нагрева влага из образца начинает испаряться, в результате чего его масса постепенно уменьшается. При этом анализатор постоянно контролирует изменения массы, фиксируя каждое изменение с высокой точностью. После завершения испарения и стабилизации массы прибор рассчитывает разницу между начальным и конечным значениями, что позволяет с высокой точностью определить количество удалённой влаги.

Данный метод позволяет оперативно и с высокой точностью получить результаты без необходимости продолжительной сушки образца. К основным преимуществам применения анализатора влажности относятся высокая точность измерений, значительное сокращение времени анализа и автоматизацию процесса, что минимизирует влияние человеческого фактора и повышает достоверность результатов. Этот метод особенно эффективен в условиях лабораторных исследований, где важны как скорость, так и точность измерений. Определение влажности осуществлялось с помощью анализатора влажности «Sartorius» (см. рисунок 2, а). Для проведения эксперимента использовались пять образцов соевой окары с различным содержанием влаги (см. рисунок 2, б).



а – анализатор влажности «Sartorius»; б – образцы соевой окары различной влажности

Рис. 2. – Общий вид установки для определения влажности

3 Результаты исследования

При определении массовой доли влаги было отобрано пять образцов соевой окары, различающихся по содержанию влаги. Результаты измерений, полученные методом высушивания до постоянной массы, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерений методом высушивания до постоянной массы.

№ образца	Вес бюкса, г	Масса навески, г	Масса образца до высушивания (m_1), г	Масса образца после высушивания (m_2), г	Массовая доля влаги (W), %
1	20,2	10	30,2	22,0	82
2	21,8	10	31,8	23,6	82
3	20,8	10	30,8	22,6	82
4	21,8	10	31,8	23,7	81
5	20,2	10	30,2	21,8	84

Полученные значения массовой доли влаги колеблются в диапазоне от 81% до 84%, что свидетельствует о достаточно высокой влажности образцов окары. Наибольшая массовая доля влаги была зафиксирована для пятого образца – 84%, а наименьшая – для четвертого образца, где она составила 81%. Полученные данные указывают на некоторую вариацию в уровне влажности образцов, что может быть связано с различиями в их составных частях или условиях хранения.

В целом, значения массовой доли влаги для всех образцов находятся в пределах 80 – 85%, что является характерным для подобных растительных материалов, особенно в условиях лабораторного анализа. В дальнейшем представляет интерес исследование влияния данной влажности на питательные и технологические свойства соевой окары.

Результаты измерений, выполненных с использованием анализатора влажности «Sartorius», приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты измерений анализатором влажности «Sartorius».

№ образца	Начальный вес, г	Продолжительность измерения, мин	Конечный вес, г	Массовая доля влаги (W), %
1	0,668	27	0,117	82,4
2	0,725	27	0,128	82,3
3	0,713	28	0,129	81,9
4	0,640	26	0,122	80,9
5	0,631	29	0,099	84,3

Массовая доля влаги в исследуемых образцах варьировалась от 80,9% до 84,3%. Наибольшее значение зафиксировано у образца 5 с массовой долей влаги – 84,3%, что может указывать на то, что указывает на его более высокую влажность по сравнению с остальными образцами. Минимальное значение отмечено у образца 4 с массовой долей влаги – 80,9%, что также подтверждает, что уровень влажности может значительно варьироваться в зависимости от состава и условий образца. Конечная масса образцов варьировалась от 0,099 г (образец 5) до 0,129 г (образец 3). Наибольшая потеря массы была зафиксирована

у образца 5, что связано с его более высокой массовой долей влаги. Остальные образцы теряли массу в меньших количествах, что также соответствует их более низкому содержанию воды. Полученные данные подтверждают, что анализатор влажности «Sartorius» является эффективным инструментом для быстрого и точного определения массовой доли влаги в образцах, при этом небольшие расхождения в результатах могут быть связаны с начальной влажностью и плотностью образцов.

На рисунке 3 представлено сравнение значений массовой доли влаги в образцах соевой окары, определённых двумя методами: сушкой до постоянной массы и использованием анализатора влажности Sartorius.

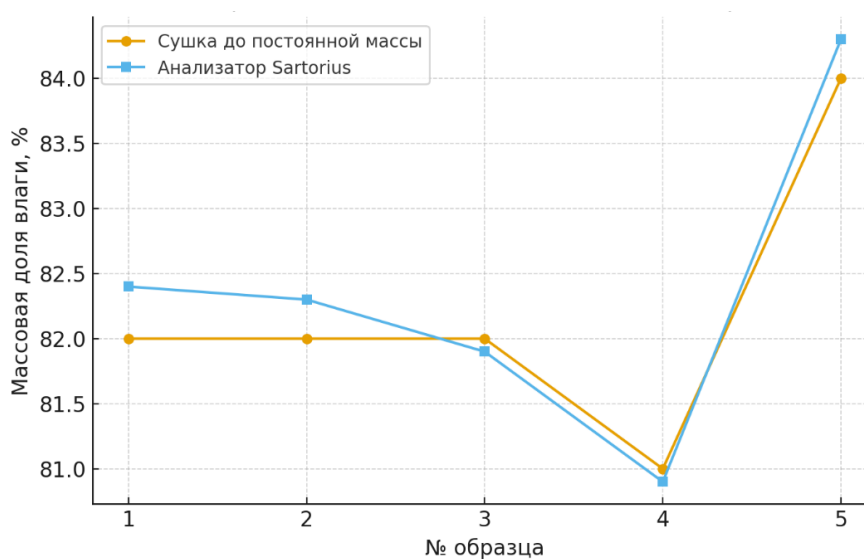


Рис. 3. – Сравнение массовой доли влаги в образцах соевой окары

Сравнительный анализ двух методов определения массовой доли влаги в образцах соевой окары – сушки до постоянной массы и использования анализатора влажности «Sartorius» – показал, что оба метода обеспечивают сопоставимые результаты, при этом значения массовой доли влаги находились в диапазоне 80,9–84 %. Однако метод сушки до постоянной массы, несмотря на высокую точность, является более трудоёмким и требует значительных временных затрат, связанных с длительной сушкой и многократным взвешиванием. В то же время анализатор влажности «Sartorius» позволяет получить результаты в течение 26 – 29 минут, что делает его более быстрым и удобным в применении. Несмотря на незначительные отклонения в данных, оба метода продемонстрировали высокую точность, и метод с анализатором влажности оказался более автоматизированным, что снижает вероятность ошибок и повышает производительность, делая его более предпочтительным для лабораторных исследований. На основе полученных результатов можно предложить несколько направлений для будущих исследований: углубленное изучение влияния уровня влажности на физические свойства соевой окары; разработку более эффективных методов сушки для минимизации потерь

питательных веществ; исследование влияния влажности на её срок хранения. Полученные результаты исследований помогут улучшить использование соевой окары в различных отраслях.

4 Выводы

В заключение, проведенное исследование показало, что оба метода – сушка до постоянной массы и использование анализатора влажности «Sartorius» – являются эффективными для определения массовой доли влаги в соевой окаре, с минимальными различиями в полученных результатах. Для метода сушки массовая доля влаги варьировалась от 81% до 84%, а для метода с анализатором влажности – от 80,9% до 84,3%. Метод сушки до постоянной массы отличается высокой точностью, но требует значительного времени и усилий, в то время как анализатор влажности обеспечивает быстрые и автоматизированные результаты, получаемые за 26 – 29 минут. Соевая окара, обладая высоким содержанием белка и других питательных веществ, представляет собой ценное сырьё, и контроль её влажности имеет ключевое значение для последующей переработки и хранения. Полученные результаты исследования могут быть использованы для оптимизации методов анализа влажности и улучшения качества переработки соевой окары в пищевой и кормовой промышленности.

Список литературы

1. Сидорик И.В., Дидоренко С.В., Зинченко А.В. Агроэкологическая оценка сои в условиях Костанайской области // Материалы Международной науч.-практ. конф. молодых ученых. – Горки, – Ч. 1. – С. 163–1;
2. Singh. V.K., Kulia. A., Yadav. G., Baneerje. B. Phenolic content in okara // Food Technol. Biotechnol. 2012. V. 9, pp. 32-38;
3. Храмцов А.Г. Компонентный состав и пребиотические свойства соевой пищевой окары // Хранение и переработка сельхозсырья. 2004. № 4. С. 50–53;
4. Тюрина, Л.Е. Использование и переработка сои: учеб. пособие // Краснояр. гос. аграр. ун-т. –Красноярск. 2008. – 90 с.;
5. Chan, W.M.; Ma, C.Y. Acid modification of proteins from soymilk residue (okara) // Food Research International. 1999, 32, 119–127;
6. Travaglini, D.A., Aguirre, J.M., Travaglini, M.M.E., Silveira, E.T.F., Delazari, I., Figueiredo, I.B. Fabrication process of powder soy extract // Collectanea of the Food Technology Institute. 1980, 11, 139–152;
7. Wang, H.L., Calvins, J.F. Yield and amino acid composition of fractions obtained during tofu production // Cereal Chemistry. 1989, 66, 359–361;
8. Кузнецова А. А., Слуцкая Т. Н., Левочкина Л. В., Кушнаренко Л. В. Использование биомодифицированной соевой окары в технологии пищевой продукции // Пищевая промышленность. 2014. – 108;

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА КАК ФАКТОР ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ НЕЗАВИСИМОСТИ КАЗАХСТАНА

Закен М.Г.*, Мясоедова Е.Н.

НАО «Шәкәрім университет», г. Семей, Казахстан

*e-mail: mejramzaken@gmail.com

В контексте мирового энергетического перехода и важности уменьшения углеродных выбросов атомная энергетика считается как один из наиболее перспективных источников чистой энергии. Наша республика, обладает крупнейшими мировыми запасами урана, имеет стратегические предпосылки для становления собственной ядерной энергетики направленная на увеличение энергетической стабильности. Мировой опыт, в частности Франции и Южной Кореи, показывает, что атомные станции способны обеспечить высокий уровень надёжности энергоснабжения при одновременном сокращении потребности от ископаемого топлива. Для Казахстана развитие атомной энергетики может стать не только фактором энергетической безопасности, но и стимулом технологической и экономической модернизации. Однако способна ли атомная Казахстана превратиться в ключевой инструмент достижения энергетической устойчивости и экологического фундамента? [1].

На графике 1 представлены данные по добыче нефти, газа и угля по регионам Казахстана. Видно, что наибольшие объёмы углеводородных ресурсов сосредоточены в западных областях страны. В то же время угольная добыча преобладает в северных и центральных регионах, обеспечивая значительную часть топливного баланса. Такое распределение ресурсов определяет региональную специализацию и формирует основу для развития энергетического комплекса Казахстана.

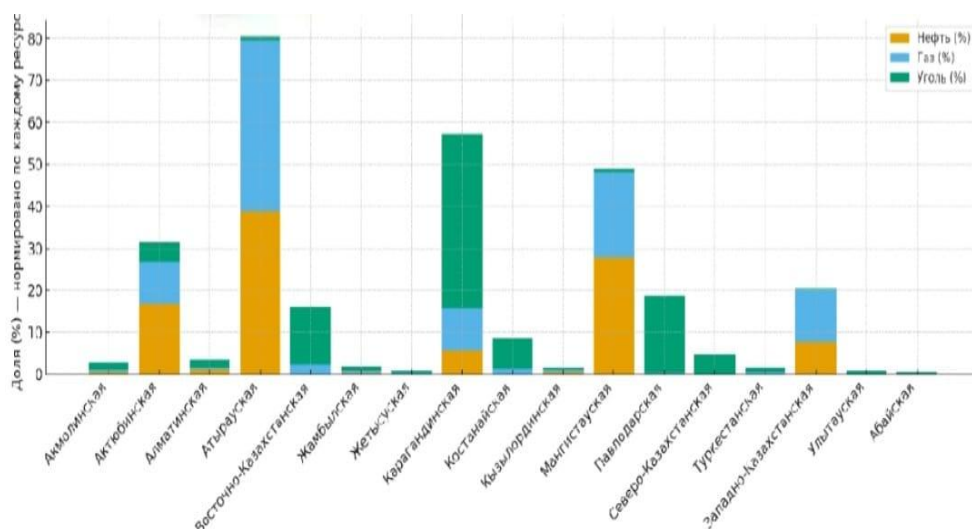


График. 1.- Добыча нефти, газа и угля по регионам Казахстана

В Казахстане добыча основных энергоресурсов имеет ярко выраженную региональную специфику. Нефть сосредоточена преимущественно на западе страны: крупнейшие доли приходятся на Атыраускую область, где добывается около 35–40% всего объёма, значительные позиции занимают также Мангистауская область с примерно 25% и Западно-Казахстанская область с долей около 7–10%. Остальные регионы в нефтедобыче играют незначительную роль. Аналогичная ситуация наблюдается и в газовой отрасли — здесь лидером также выступает Атырауская область с приблизительно 40% общего объёма, за ней следуют Мангистауская область с 20% и Западно-Казахстанская область с 12%, в то время как центральные и южные регионы почти не вовлечены в добычу газа.

Совершенно иная картина характерна для угольной промышленности: здесь ведущую роль играет Карагандинская область, на долю которой приходится 45% всего угля, а также Павлодарская область с 20% и Восточно-Казахстанская область с 15%.

В таблице 1 представлен SWOT-анализ атомной энергетики Казахстана который позволяет комплексно оценить сильные и слабые стороны, а также выявить потенциальные возможности для расширения ее роли в национальной энергетической стратегии.

Таблица 1. SWOT-анализ атомной энергетики Казахстана.

Сильные стороны	Слабые стороны
1. Казахстан обладает крупнейшими в мире запасами урана 2. Возможность диверсификации энергобаланса и снижения зависимости от угля 3. Экспортный потенциал ядерного топлива 4. Повышение международного имиджа Казахстана как технологически развитой страны	1. Отсутствие действующих АЭС и опыта их эксплуатации 2. Недостаточный уровень общественного доверия 3. Длительные сроки строительства 4. Дефицит квалифицированных кадров и специалистов
Возможности	Угрозы
1. Развитие научно-технической базы 2. Привлечение иностранных инвестиций и технологий 3. Создание новых рабочих мест 4. Участие в международных ядерных проектах	1. Риск аварий и техногенных катастроф 2. Конкуренция со стороны возобновляемых источников энергии 3. Возможные санкции 4. Геополитические риски

Атомная энергетика представляет для Казахстана стратегическое направление, так как страна обладает крупнейшими в мире запасами урана и развитой сырьевой базой. Сильные стороны заключаются в устойчивом

обеспечении энергосистемы и потенциале экспорта ядерного топлива, что укрепляет позиции страны на мировом энергетическом рынке. Слабые стороны связаны с отсутствием опыта эксплуатации АЭС, высокой капиталоемкостью проектов и общественным недоверием, что требует системной государственной поддержки и привлечения зарубежных партнёров. Возможности включают повышение энергетической независимости, создание новых рабочих мест, развитие инфраструктуры и экспорт электроэнергии в страны Центральной Азии. [2].

Основные угрозы выражаются в рисках аварий, конкуренции со стороны возобновляемых источников и геополитических факторах, которые могут ограничить развитие отрасли. В целом эффективность атомной энергетики определяется её способностью обеспечить Казахстан стабильной и экологически чистой энергией при условии грамотного управления рисками и ресурсами. [3].

Далее приведены расчеты сокращения выбросов углерода при замене угля на уран в городах Алматы и Семей.

Расчеты сокращения выбросов углерода при замене 25 % угля на уран в городе Алматы:

$$\begin{aligned} 1 \text{ ГВт} \cdot \text{ч} &= 1000000 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \\ E_{\text{общ}} &= E \cdot 1000000 \end{aligned} \quad (1)$$

где $E_{\text{общ}}$ — общая энергия затрачиваемая на производство угля, кВт · ч

E — общее потребление электроэнергии, ГВт · ч/год

$$E_{\text{общ}} = 4000 \cdot 1000000 = 4000000000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$E_{\text{угля}} = E_{\text{общ}} \cdot S_{\text{уголь}} \quad (2)$$

где $E_{\text{угля}}$ — энергия угля, кВт · ч

$S_{\text{уголь}}$ — доля угля, %

$$E_{\text{угля}} = 4000000000 \cdot 0,6 = 2400000000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$E_{\text{замены}} = E_{\text{угля}} \cdot f_{\text{замены}} \quad (3)$$

где $E_{\text{замены}}$ — энергия замены, кВт · ч

$f_{\text{замены}}$ — доля замены, %

$$E_{\text{замены}} = 2400000000 \cdot 0,25 = 600000000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$H = H_{\text{угля}} - H_{\text{урана}} \quad (4)$$

где H – разница выбросов, г/кВт · ч

$H_{\text{угля}}$ – коэффициент выбросов угля, г/кВт · ч

$H_{\text{урана}}$ – коэффициент выбросов урана, г/кВт · ч

$$H = 900 - 12 = 888 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$$

$$K_{\text{уголь}} = H_{\text{угля}} \cdot E_{\text{замены}} \quad (5)$$

где $K_{\text{уголь}}$ – выбросы от использования угля, кг

$$K_{\text{уголь}} = 900 \cdot 600000000 = 540000000000 \text{ кг}$$

$$K_{\text{урана}} = H_{\text{урана}} \cdot E_{\text{замены}} \quad (6)$$

где $K_{\text{урана}}$ – выбросы от использования урана, кг

$$K_{\text{урана}} = 12 \cdot 600000000 = 7200000000 \text{ кг}$$

$$T_{\text{выбросы}} = K_{\text{уголь}} - K_{\text{урана}} \quad (7)$$

где $T_{\text{выбросы}}$ – коэффициент снижения выбросов, т

$$T_{\text{выбросы}} = 540000000000 - 7200000000 = 532800000000$$

$$\frac{532800000000}{1000000} = 532800 \text{ т CO}_2 \text{ в год}$$

Расчеты сокращения выбросов углерода при замене 50 % угля на уран в городе Семей:

$$E_{\text{общ}} = E \cdot 1000000 \quad (8)$$

где $E_{\text{общ}}$ – общая энергия затрачиваемая на производство угля, кВт · ч

E – общее потребление электроэнергии, ГВт · ч/год

$$E_{\text{общ}} = 200 \cdot 1000000 = 200000000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$E_{\text{угля}} = E_{\text{общ}} \cdot S_{\text{уголь}} \quad (9)$$

где $E_{\text{угля}}$ – энергия угля, кВт · ч

$S_{\text{уголь}}$ – доля угля, %

$$E_{\text{угля}} = 200000000 \cdot 0,8 = 160000000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$E_{\text{замены}} = E_{\text{угля}} \cdot f_{\text{замены}} \quad (10)$$

где $E_{\text{замены}}$ – энергия замены, кВт · ч

$f_{\text{замены}}$ – доля замены, %

$$E_{\text{замены}} = 160000000 \cdot 0,5 = 80000000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$H = H_{\text{угля}} - H_{\text{урана}} \quad (11)$$

где H – разница выбросов, г/кВт · ч

$H_{\text{угля}}$ – коэффициент выбросов угля, г/кВт · ч

$H_{\text{урана}}$ – коэффициент выбросов урана, г/кВт · ч

$$H = 900 - 12 = 888 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$$

$$K_{\text{уголь}} = H_{\text{угля}} \cdot E_{\text{замены}} \quad (12)$$

где $K_{\text{уголь}}$ – выбросы от использования угля, кг

$$K_{\text{уголь}} = 900 \cdot 80000000 = 72000000000 \text{ кг}$$

$$K_{\text{урана}} = H_{\text{урана}} \cdot E_{\text{замены}} \quad (13)$$

где $K_{\text{урана}}$ – выбросы от использования урана, кг

$$K_{\text{урана}} = 12 \cdot 80000000 = 960000000 \text{ кг}$$

$$T_{\text{выбросы}} = K_{\text{уголь}} - K_{\text{урана}} \quad (14)$$

где $T_{\text{выбросы}}$ – коэффициент снижения выбросов, т

$$T_{\text{выбросы}} = 72000000000 - 9600000000 = 71040000000$$

$$\frac{71040000000}{1000000} = 71040 \text{ т CO}_2 \text{ в год}$$

По результатам выполнения расчетов были построены графики для городов Алматы и Семей, на которых показаны прогнозы сокращения углеродных выбросов в зависимости от выработки электроэнергии атомными электростанциями.

На графике 2 представлен наглядный рост сокращения выбросов CO_2 по мере увеличения доли угля в энергобалансе города Алматы. Чем выше доля угольной генерации, тем больше эффект от её частичной замены атомной энергией. При этом результаты показывают, что даже при сравнительно небольшой доле угля (25%) переход на АЭС способен дать значительное снижение выбросов.

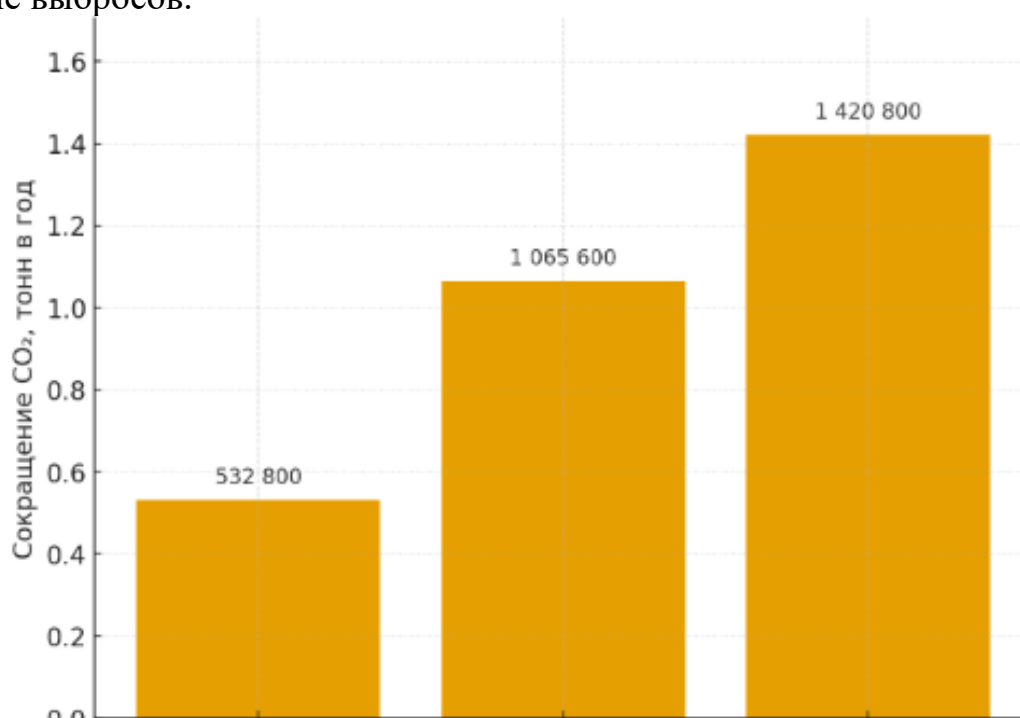


График. 2. – Сокращение углеродных выбросов при замене угля на уран в качестве источника энергии в городе Алматы

На графике для города Алматы показано сокращение выбросов CO_2 при замене 50% угольной генерации атомной в зависимости от доли угля в энергобалансе. При доле угля 25% сокращение составит около **532 800 тонн CO_2 в год**, что уже является значимой величиной для одного города. Если доля угля возрастает до 60%, эффект сокращения выбросов увеличивается вдвое и достигает **1 065 600 тонн CO_2 в год**. При высокой зависимости от угля (80%)

экономия достигает **1 420 800 тонн CO₂ в год**, что демонстрирует прямую пропорциональность между долей угля и возможным снижением выбросов. Основная причина такой зависимости заключается в том, что больший объём угольной генерации, замещаемый атомной энергией, даёт более значимый эффект в снижении выбросов. Таким образом, для Алматы внедрение атомной энергетики особенно эффективно при высоких долях угольной генерации, так как разница коэффициентов выбросов между углём и ураном (888 г/кВт·ч) обеспечивает существенное сокращение загрязнения атмосферы.

На графике 3 для города Семей видно, что сокращение выбросов CO₂ при замене 50% угольной генерации на атомную зависит от доли угля в энергобалансе. При доле угля 10% снижение составит около **26 640 тонн CO₂ в год**, при 30% — уже **53 280 тонн**, а при 50% достигает **71 040 тонн**. Показатели значительно меньше, чем у Алматы, что связано с меньшим общим объёмом энергопотребления в Семее.

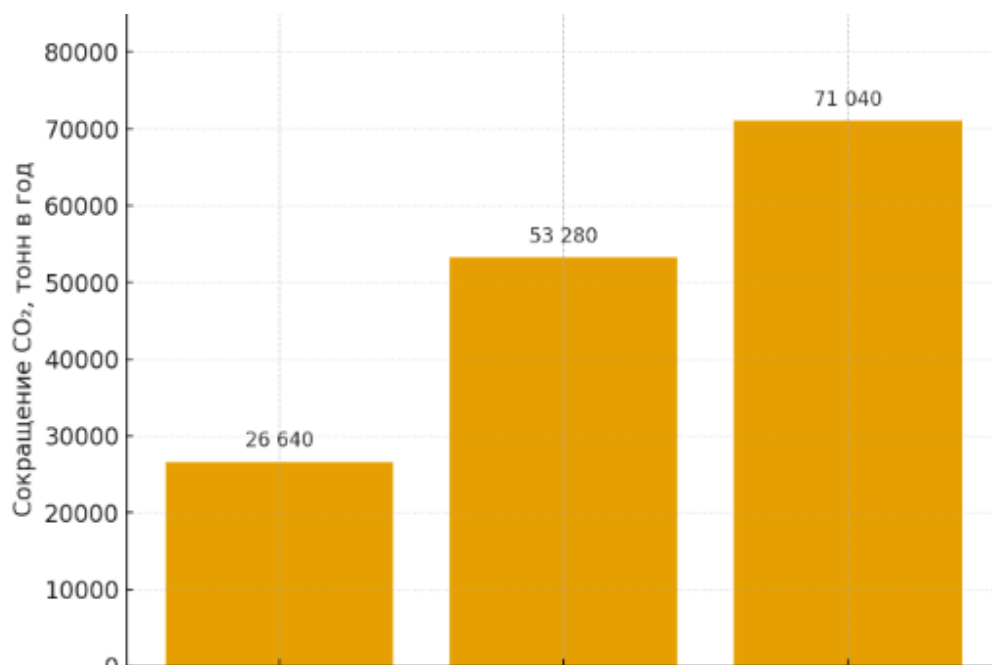


График. 3.- Сокращение углеродных выбросов при замене угля на уран в качестве источника энергии в городе Семей

В заключение, можно отметить что атомная энергетика является одним из ключевых факторов обеспечения энергетической независимости Казахстана. Проведённые расчёты показывают, что замена даже части угольной генерации на атомную позволяет существенно сократить выбросы CO₂: для крупных городов, таких как Алматы, снижение измеряется миллионами тонн в год, а для региональных центров, как Семей, десятками тысяч тонн. Эти результаты подтверждают высокую экологическую эффективность атомной энергетики по сравнению с традиционными угольными ТЭС. Кроме того, атомные станции обеспечивают стабильную базовую генерацию, что особенно важно в условиях растущего энергопотребления и необходимости уменьшения зависимости от

ископаемого топлива. Развитие атомной энергетики позволит Казахстану не только снизить углеродный след, но и укрепить энергетическую безопасность, обеспечив долгосрочное устойчивое развитие экономики. [4].

Список использованной литературы

1. Журинов М.Ж. Энергетическая стратегия Казахстана. – Алматы: Қазақ университеті, 2014. – 280 с.
2. Ажигалиев С.А., Шарипов Ж.М. Перспективы развития атомной энергетики в Казахстане. – Астана: Фолиант, 2019. – 224 с.
3. Дюсембаев К.К. Экономика и экология атомной энергетики Казахстана. – Алматы: Экономика, 2016. – 310 с.
4. Бектурганов Н.С., Ахметов А.К. Ядерная энергетика и безопасность: опыт и перспективы Казахстана. – Алматы: Ғылым, 2020. – 340 с.

ӘОК 620.92

ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫН ӨНДІРУ ҮДЕРІСТЕРІНІҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ТАЛДАУЫ: ЖЭС ҮШІН КЕШЕНДІ ТӘСІЛ

Асқарұлы М.^{1*}, Онгар Б.², Дүйсенбек Ж.С.³

¹ М. Тынышпаев атындағы АЛТ университеті, Қазақстан, Алматы қ.

² Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,
Қазақстан, Алматы қ.

³ Ғ.Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Қазақстан, Алматы қ.

*e-mail: m.askaruly@icloud.com

Аңдатпа: Бұл мақалада жылу электр станцияларында (ЖЭС) электр энергиясын өндіру үдерістерін энергетикалық тұрғыдан кешенді талдау жүргізу арқылы энергетикалық тиімділікті арттыру мәселесі қарастырылады. Зерттеудің негізгі мақсаты – ЖЭС-тегі негізгі технологиялық жабдықтардың (қазандық агрегаттары, бу турбиналары, конденсаторлар, жылу алмастырғыштар және т.б.) жұмыс режимдеріне энергетикалық және эксергетикалық талдау жасау арқылы энергия шығындарының құрылымын анықтау және оларды азайту жолдарын ұсыну.

Мақалада нақты ЖЭС жұмысының деректері негізінде электр энергиясын өндірудің тиімділігіне әсер ететін негізгі факторлар анықталып, отын-энергетикалық ресурстардың (ОЭР) пайдаланылу деңгейі бағаланды. Зерттеу барысында термодинамикалық және эксергетикалық талдау әдістері қолданылып, әрбір технологиялық кезеңдегі энергия түрленуінің сапалық және сандық көрсеткіштері есептелді.

Нәтижесінде, ЖЭС құрылымындағы энергия жоғалту аймақтары анықталып, жылу-энергетикалық жүйелерді оңтайландыруға мүмкіндік беретін техникалық және технологиялық шаралар ұсынылды. Бұл шаралар отын шығынын төмендетуге, пайдалы әсер коэффициентін (ПӘК) арттыруға және қоршаған ортаға зиянды заттардың бөлінуін азайтуға бағытталған.

Мақала электр энергетикасы саласындағы инженер-техник мамандарға, энергетикалық жүйелерді жобалаушыларға және ЖЭС жұмысын жетілдірумен айналысатын зерттеушілерге арналған.

Түйінді сөздер: Жылу электр станциясы (ЖЭС), электр энергиясын өндіру, энергетикалық тиімділік, эксергетикалық талдау, энергия шығындары, энергия үнемдеу, энергия тиімділігі, жылу технологиялық үдеріс.

Кіріспе

Қазіргі заманда энергетикалық ресурстарды тиімді пайдалану, электр энергиясын өндірудің экологиялық қауіпсіздігі мен үнемділігі жаһандық маңызға ие болып отыр. Әсіресе, жылу электр станциялары (ЖЭС) - Қазақстан және көптеген елдердің электр энергиясын өндірудің негізгі көзі болып табылады. Дегенмен, дәстүрлі ЖЭС-тегі электр энергиясын өндіру үдерісі кезінде едәуір көлемде энергия шығындары орын алып, пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК) төмен деңгейде қалып отыр. Сонымен қатар, энергияның бір бөлігінің жоғалуы қоршаған ортаға зиянды әсер ететін көміртек қостотығы (CO_2) және басқа да парниктік газдардың бөлінуіне алып келеді. Осыған байланысты, ЖЭС жұмысын жан-жақты энергетикалық талдау негізінде оңтайландыру - қазіргі таңда аса өзекті ғылыми-техникалық мәселе ретінде қарастырылады.

Мақалада қарастырылатын басты мақсат - ЖЭС құрылымындағы электр энергиясын өндіру үдерістерін энергетикалық және эксергетикалық тұрғыдан кешенді талдау арқылы энергия шығындарын анықтап, олардың себептерін айқындау және бұл шығындарды азайтуға бағытталған тиімді техникалық шешімдер ұсыну. Бұл тәсіл ЖЭС жұмысындағы әлсіз тұстарды анықтап, жалпы станция тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді [1-2].

Мәселенің өзектілігі - қазіргі таңда көптеген ЖЭС-тердің техникалық жабдықтары моральдық және физикалық тұрғыдан ескірген, ал өндірістік процестердің энергетикалық тиімділігі төмен деңгейде қалып отыр. Мұндай жағдайда ғылыми негізделген энергетикалық талдау әдістерін пайдалану - өндірістік көрсеткіштерді жақсартудың, отын шығынын азайтудың және экологиялық қауіп-қатерді төмендетудің маңызды жолдарының бірі болып табылады.

Зерттеудің практикалық мәні - алынған нәтижелер мен ұсыныстарды нақты ЖЭС жұмысына енгізу арқылы электр энергиясын өндіру тиімділігін арттыру, отын үнемдеу, пайдалану шығындарын азайту және экологиялық тұрақтылықты қамтамасыз етуге ықпал етуінде. Сонымен қатар, мақалада ұсынылған әдістемелер мен талдау тәсілдері болашақта жаңа энергетикалық

қондырғыларды жобалау мен қолданыстағы жүйелерді жаңғырту кезінде пайдалануға мүмкіндік береді.

Материалдар мен әдістер

Бұл зерттеуде материал ретінде Қазақстан аумағындағы типтік конденсациялық жылу электр станциясының (ЖЭС) технологиялық параметрлері, нақты жұмыс режимдері және электр энергиясын өндіру үдерісіне қатысатын негізгі жабдықтардың (қазандық агрегаты, бу турбины, конденсатор, жылу алмастырғыш жүйелер және т.б.) техникалық сипаттамалары пайдаланылды. ЖЭС-тің жұмыс режиміне қатысты бастапқы деректер - станцияның технологиялық журналдары мен автоматтандырылған бақылау жүйелері арқылы алынған [3].

1) Термодинамикалық талдау әдісі. Электр энергиясын өндірудің негізгі процестері - жану, буды өндіру, кеңейту және конденсациялау – классикалық термодинамика заңдары негізінде талданды. Жылу мен жұмыс арасындағы байланыс, энтальпия өзгерісі, ішкі энергия және температуралық айырмалар арқылы жабдықтардың ПЭК-і (пайдалы әсер коэффициенті) есептелді. Бұл талдау Ренкин циклі мен оның нақты (реалды) нұсқасы шеңберінде жүргізілді.

2) Эксергетикалық (эксергия) талдау. Эксергетикалық талдау – энергияның сапалық көрсеткіштерін бағалауға мүмкіндік беретін әдіс. Бұл әдіс арқылы әрбір технологиялық кезеңдегі эксергия кірісі, шығысы және жоғалтулар есептелді.

Эксергия - бұл жүйенің қоршаған ортамен тепе-теңдікке келгенге дейін пайдалы жұмыс өндіру қабілетін сипаттайтын энергияның сапалық өлшемі. Оның негізгі ерекшелігі - тек қана барлық процестер қайтымды болған жағдайда ғана сақталуы, ал кез келген қайтымсыз процестер кезінде эксергия жойылады немесе азаяды. Бұл жойылу мөлшері жүйенің ішкі термодинамикалық жетілмегендігін, яғни идеалдан ауытқуын білдіреді [4-6].

Электр станциясы, химиялық өңдеу зауыты немесе тоңазытқыш секілді күрделі инженерлік жүйелерде эксергиялық талдау жүргізу - энергияны тек сандық емес, сапалық тұрғыдан да бағалауға мүмкіндік береді. Мұндай талдау кезінде әрбір құрылғыдағы және жалпы жүйедегі эксергиялық бұзылулар (жоғалтулар) сандық түрде есептеліп, олардың себептері нақты айқындалады. Бұл эксергетикалық бұзылулар, негізінен, энергияны пайдалы жұмысқа айналдыру кезіндегі сапа жоғалтуларын (будың толық жұмысқа айналмауы, үйкеліс, жылу өткізу кезіндегі температура айырмашылығы, т.б.) көрсетеді.

Сонымен, эксергетикалық талдау инженерлерге:

- Қай құрылғыда немесе процесте энергияның сапасы көбірек жойылып жатқанын анықтауға;
- Жүйенің қай бөлігін оңтайландыру қажет екенін нақтылауға;
- Жоғалтуларды азайтып, жалпы тиімділікті арттыру жолдарын ұсынуға мүмкіндік береді.

Энергия тәрізді, эксергия да жүйе шекарасы арқылы берілуі немесе тасымалдануы мүмкін. Бірақ эксергия тек сандық емес, сапалық тұрғыдан да ерекшеленеді: ол тек энергия мөлшерін емес, оның пайдалы жұмысқа айналу қабілетін ескереді. Энергияны тасымалдаудың әрбір түріне – жұмыс, жылу, масса алмасуы – сәйкес эксергия тасымалдау формасы тән.

Жылу алмасуына байланысты эксергия тасымалы - қоршаған орта температурасына (T_0) қатысты, жылу берілетін температураға (T) тәуелді. Бұл эксергия мөлшері төмендегідей өрнекпен есептеледі:

$$\dot{E} x_Q = \int_i^f \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) \delta Q_i \quad (1)$$

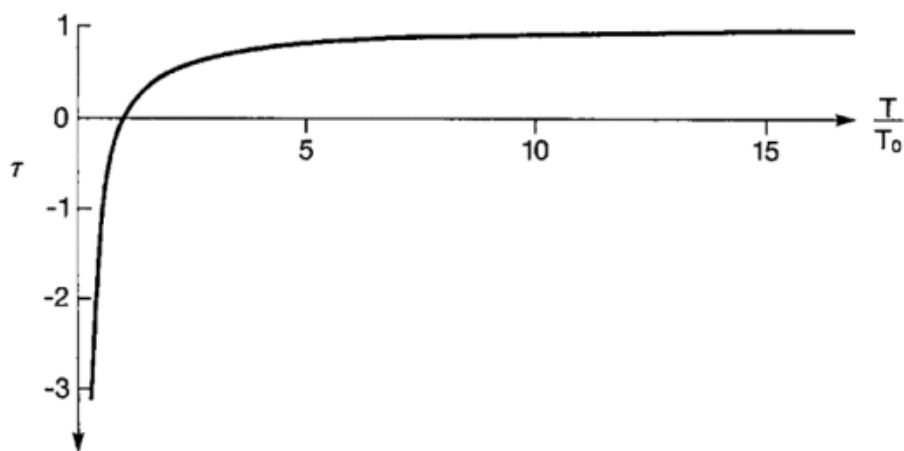
мұндағы, δQ - элементар (өспелі) жылу мөлшері; T - жылу беріліп жатқан дененің (жүйенің) локалдық температурасы; T_0 – қоршаған ортаның температурасы (өлі күй, K); i және f – бастапқы және соңғы күйлер; E_{xQ} – берілген жылуға сәйкес эксергия мөлшері.

Бұл интеграл жылулық эксергияны, яғни берілген температуралық режимдегі жылуды пайдалы жұмысқа айналдырудың теориялық шегін сипаттайды. Яғни, бұл – бақылау массасын өлі күйден соңғы күйге келтіру үшін қоршаған ортамен бірігіп әрекет ететін жүйенің атқаруы тиіс ең аз жұмыс.

Жақша ішіндегі өлшемсіз шаманы:

$$\tau = \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (2)$$

деп белгілейді және оны эксергетикалық температура коэффициенті деп атайды. Бұл коэффициент жылу тасымалданатын температураның эксергетикалық "сапасын" сипаттайды. Яғни, жылу неғұрлым жоғары температурада берілсе, соғұрлым оның эксергетикалық құндылығы (τ) жоғары болады.



Сурет 1. – Эксергетикалық талдау

Бұл график арқылы біз мынаны көреміз:

- Жоғары температуралы жылу ($T \gg T_0$), жоғары сапалы энергия, жұмысқа айналдыру оңай.

- Төмен температуралы жылу ($T \approx T_0$ немесе одан төмен), төмен сапалы энергия, жұмысқа айналдыру мүмкін емес.

Демек, эксергетикалық талдау энергияның мөлшерін емес, оны қаншалықты тиімді қолдануға болатынын анықтайды. Энергия мөлшері бірдей болса да, әртүрлі температурадағы жылу энергиясының эксергетикалық (пайдалы) құндылығы әртүрлі.

Электр энергиясының эксергиясы оның энергия мөлшеріне тең.

$$E_{ex, эл} = E_{эл} \quad (2)$$

Бұл дегеніміз, генератордан шыққан электр энергиясы 100% эксергия ретінде қабылданады [7].

ЖЭС үшін эксергетикалық баланс:

$$E_{ex, отын} = E_{эскер жоғал} + E_{эскер шығыны} + E_{электр энерг} \quad (2)$$

мұндағы, $E_{ex, отын}$ - отынның эксергиясы (химиялық потенциал); $E_{эскерия жоғалтулар}$ - жану, үйкеліс, жылу беру кезінде жоғалатын эксергия; $E_{электр энергиясы}$ - электр генераторынан шығатын таза эксергия.

ЖЭС жүйесінде өндірілген электр энергиясы — жүйенің эксергетикалық тиімділігіне тікелей әсер ететін, эксергияның ең құнды әрі таза түрі болып саналады.

Нәтижелер мен талқылаулар

Зерттеу барысында Алматы қаласындағы ЖЭС-2 жұмыс режимі негізінде электр энергиясын өндіру үдерістерінің энергетикалық және эксергетикалық тиімділігі кешенді түрде талданды. Энергия және эксергия баланстары құрылып, негізгі шығын көздері мен эксергетикалық потенциалы жоғары аймақтар анықталды.

ЖЭС-2 станциясының типтік жұмыс режимі үшін есептеулер нәтижесінде:

- Отынның бастапқы энергиясы: 1000 МВт (шартты);
- Электр энергиясы өндірісі: ≈ 408 МВт;
- Пайдалы жылу энергиясы (жылыту жүйесіне): ≈ 1107 МВт;
- Жүйелік жалпы КПД (пайдалы энергия/отын энергиясы):

$$\eta_{жалпы} \approx 1,515 \Rightarrow 151,5\%$$

Бұл нәтиже когенерациялық режимнің бар екенін, яғни электр және жылу энергиясы бір мезгілде өндірілетінін көрсетеді. Бірақ бұл «жылу» толық эксергия

емес, сондықтан жүйенің эксергетикалық тиімділігі одан әлдеқайда төмен болады.

Ал эксергетикалық тиімділік және шығындарды 1-кестеден көруге болады.

1- кесте. Эксергетикалық тиімділік және шығындар

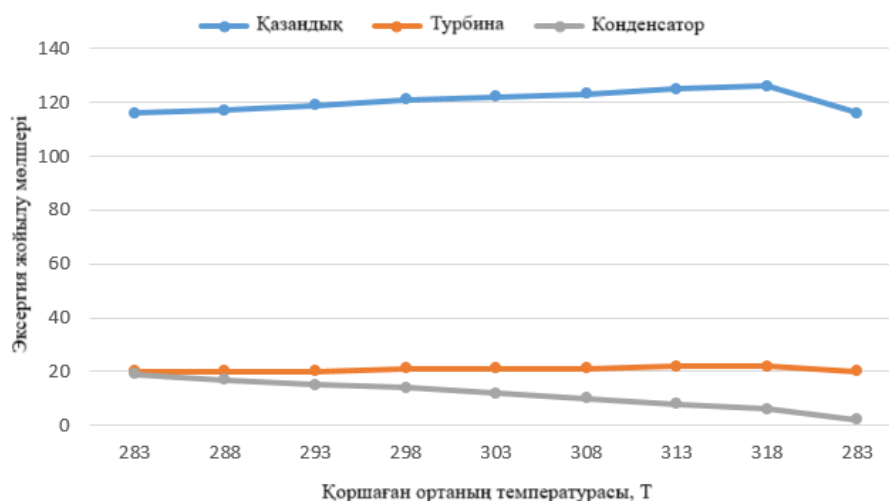
№	Көрсеткіш	Шамасы (МВт)	Үлес (%)
1	Отынның бастапқы эксергиясы	1000	100
2	Электр энергиясы (эксергияға тең)	408	40,8
3	Жылу энергиясының эксергиясы	214	21,4
4	Эксергетикалық шығындар мен жойылу	378	37,8

Сонда эксергетикалық тиімділік

$$\eta_{ex} = \frac{E_{ex, \text{пайдалы}}}{E_{ex, \text{отын}}} = 0,622 = 62,2 \% \quad (3)$$

Бұл көрсеткіш ЖЭС жүйесінің жылулық және механикалық процестерде айтарлықтай эксергия шығындары орын алатынын білдіреді [8-9].

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, ЖЭС жүйесінде электр энергиясы - эксергияның ең таза әрі тиімді түрі, ал жылу энергиясының тек аз бөлігі ғана эксергия ретінде қарастырылады. Осы тұрғыдан алғанда, эксергетикалық тиімділікті арттыру үшін негізгі назар энергия сапасын сақтауға және қайтымсыздықтарды төмендетуге аударылуы қажет.



Сурет 2. – Эксергетикалық тиімділіктің қоршаған орта температурасына тәуелділігі

2-ші суретте, қазандық – негізгі эксергия жойылатын аймақ. Ал қоршаған орта температурасы жоғарылаған сайын:

- Конденсатордағы эксергия жойылуы айтарлықтай азаяды.

- Турбина мен қазандықта шамалы ғана өзгеріс бар, бірақ жоғары болып қалады.

ЖЭС тиімділігін арттыру үшін қазандықтағы қайтымсыз процестерді азайту (жылу алмасу тиімділігін арттыру), сондай-ақ конденсация тиімділігін жақсарту маңызды (2-кесте).

2-кесте. Жүйелі қорытынды нәтижесі

№	Компонент	Эксергетикалық тиімділік деңгейі	Температураға әсері
1	Турбина	Ең жоғары (~72–73%)	Тәуелсіз/тұрақты
2	Қазандық	Орташа (~43–45%)	Сәл төмендейді
3	Конденсатор	Төмен (22–42%)	Температура артқанда өседі

ЖЭС жүйесінде турбина - эксергетикалық ең тиімді компонент болып саналады. Бұл механикалық жұмыс түрлендірудің қайтымдыға жақын өтуімен түсіндіріледі [10].

Қазандықта эксергия шығындары көп, сондықтан тиімділігі шектеулі. Бұл жану және жылу алмасудағы қайтымсыздықтармен байланысты.

Конденсаторда тиімділік төмен, бірақ қоршаған орта температурасы артқанда эксергетикалық өнімділік айтарлықтай жақсарады. Бұл температура айырмасының азаюымен байланысты.

Жалпы станция бойынша эксергетикалық оңтайландыру үшін турбина тиімділігін сақтау, қазандық пен конденсатор тиімділігін арттыру қажет.

Қорытынды

Бұл зерттеуде электр энергиясын өндіру үдерістерінің энергетикалық және эксергетикалық тұрғыда тиімділігін бағалау мақсатында Алматы қаласындағы ЖЭС-2 нысаны кешенді талдау жүргізілді. Энергия балансы мен эксергетикалық балансты салыстыра отырып, жүйеде орын алатын қайтымсыздықтар, эксергия шығындары және пайдалы эксергия ағындары нақты анықталды.

Жүргізілген талдаулар нәтижесінде:

1) Электр энергиясы - эксергияның ең таза әрі тиімді түрі екені дәлелденді. Электр энергиясының эксергиялық мәні оған толықтай тең, яғни ол 100% пайдалы жұмыс көзі бола алады;

2) Жылу энергиясы - температураға байланысты эксергиялық потенциалы төмен екені анықталды. Жүйеде өндірілетін жылу энергиясының тек 19–20%-ы ғана эксергия ретінде қарастырылады;

3) ЖЭС-2 жүйесінің жалпы эксергетикалық тиімділігі $\approx 62\%$ шамасында бағаланды. Бұл - когенерациялық режимнің тиімділігін көрсететін маңызды

көрсеткіш болғанымен, эксергетикалық шығындардың да айтарлықтай үлесі бар екенін көрсетті;

4) Негізгі эксергетикалық шығындар қазандықтағы жану процесінде, турбина мен конденсаторда, сондай-ақ жылу алмасу кезінде анықталды.

Бұл жүйенің негізгі қайтымсыздық көздері болып табылады.

Осы зерттеу нәтижелері ЖЭС жүйесін жетілдіру және эксергиялық тиімділікті арттыру үшін мынадай бағыттарды ұсынады:

- Қазандықтарда жанудың термодинамикалық жетілдірілуі;

- Турбина мен конденсаторда жоғары тиімді жабдықтарды қолдану;

- Температура деңгейін басқару арқылы жылу энергиясының эксергиялық сапасын арттыру,

- Жаңартылатын энергия көздерімен біріктіру арқылы жүйенің эксергетикалық құрылымын жақсарту.

Қорытындылай келе, эксергетикалық талдау - ЖЭС сияқты күрделі энергетикалық жүйелердің ішкі қайтымсыздықтарын анықтап, олардың тиімді жұмыс істеуін қамтамасыз ету үшін таптырмас құрал. Бұл тәсіл болашақта энергия үнемдеу стратегияларын әзірлеу мен өнеркәсіптік нысандардың экологиялық жүктемесін төмендетуде кеңінен қолданылуы тиіс.

Пайдаланған деректер тізімі

1. Хожин Г. Электр станциялары мен қосалқы станциялар: Оқулық /— Алматы, 2014.— 452 б.

2. Ganapathy T, Alagumurthi N, Gakkhar RP, Murugesan K. Exergy analysis of operating lignite fired thermal power plant. *Journal of Engineering Science and Technology Review* 2009;2:123–30.

3. Aghbashlo, M., & Rosen, M. (2018). Consolidating exergoeconomic and exergoenvironmental analyses using the emergy concept for better understanding energy conversion systems. *J. Clean. Prod.* 172, 696-708. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.205>

4. Alibaba, M., Pourdarbani, R., Khoshgoftar Manesh, M., Valencia Ochoa, G., & Duarte Forero, J. (2020). Thermodynamic, exergo-economic and exergo-environmental analysis of hybrid geothermal-solar power plant based on ORC cycle using emergy concept. *Heliyon* 6. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03758>.

5. Преображенская Л.Б. Структура производства электроэнергии в странах мира. *Энергия*. №1. 2006.

6. Г.Х. Хожин, С.Е. Соколов, Р.М. Кузембаева. Электроэнергетика. Оқу құралы. — Алматы, ҚазККА, 2007. — 140 б.

7. Зубова О. А. Утилизация золошлаков ТЭС в зарубежных странах // *Вестник КазГАСА*. — 2009. — № 4(34). — С. 139-142.

8. Hasan HE, Ali VA, Burhanettin, Ahmet D, Suleyman HS, Bahri S, Ismail T, Cengiz G, Selcuk A. Comparative energetic and exergetic performance analyses for coal-fired thermal power plants in Turkey. *International Journal of Thermal Sciences* 2009;48:2179–86.

9. Hongbin Zhao, Yun Bai (China University of Petroleum Beijing, China), Lan Wei(Natural Gas Production and Marketing Plant, Liutun town, Puyang municipal, Henan province) .Exergy Analysis of a 600MW Thermal Power Plant.

10. Dincer I, Rosen MA. Effect of varying dead state properties on energy and exergy analysis of thermal system. International Journal of Thermal sciences 2004; 43:121-33.

УДК 533.697.3:536.24

ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ ВИХРЕВЫХ ТРУБОК

Касымов Р.Р., Муханов Б.К.

Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева¹
e-mail: ras.kassymov@aes.kz

Введение

Вихревая трубка, именуемая также трубкой Ранка–Хилша, представляет собой механически простое устройство, лишённое каких–либо движущихся частей, которое способно разделять поток сжатого газа на два отдельных потока с разными температурными характеристиками: один горячий и один холодный. С момента изобретения этого устройства Жоржем Ранком в 1930–х годах, оно вызывает интерес у научного сообщества благодаря своей необычной способности создавать температурный градиент, используя единственно энергию сжатого газа. Этот процесс, при котором происходит разделение тепла, носит название эффект Ранка–Хилша. Это явление подразумевает собой преобразование энергии сжатого газа в кинетическую энергию вихревого потока, а потом в тепловую энергию горячего и холодного потоков.

Актуальность изучения вихревых трубок обусловлена растущими запросами на простые в применении, надёжные в работе и экологически чистые технологии локального охлаждения и нагрева. В отличие от традиционных холодильных установок, вихревые трубки не требуют применения хладагентов, потребления электроэнергии непосредственно в месте применения, а также сложного технического обслуживания, что существенно снижает эксплуатационные расходы и воздействие на окружающую среду. Благодаря этим преимуществам, они становятся востребованными в различных областях, таких как охлаждение режущего инструмента при высокоскоростной обработке материалов, отвод тепла от электронных компонентов, анализ газовых смесей и даже в медицинском оборудовании для поддержания стабильной температуры. Кроме того, вихревые трубки находят применение в системах кондиционирования воздуха, где важна компактность и экономичность решения.

Производительность вихревой трубки напрямую связана с её геометрическими характеристиками и параметрами работы. Небольшие изменения в конструкции сопла, геометрии вихревой камеры или пропорциях основной трубы могут заметно влиять на итоговую температуру и объём как холодного, так и горячего потоков. Традиционные методы проектирования, как правило, основываются на эмпирически полученных данных, что не всегда гарантирует достижение оптимальной эффективности для конкретной задачи, учитывая разнообразие условий эксплуатации и требуемых параметров. Важным является правильный выбор материала трубки, который должен обладать хорошей теплопроводностью и устойчивостью к перепадам температур.

Современные исследования направлены на оптимизацию геометрических параметров вихревых трубок с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD) и экспериментальных стендов. Главная цель этих исследований – добиться максимального температурного разделения и увеличения коэффициента полезного действия (КПД) устройства. При этом, в научной литературе часто внимание уделяется либо какому-то одному конструктивному элементу, такому как форма сопла, либо рабочим характеристикам используемого газа, не учитывая комплексное взаимодействие всех параметров. Вопросы, касающиеся всестороннего анализа и классификации именно конструктивных изменений и их влияния на рабочие показатели устройства, требуют более глубокой проработки. Решение этой проблемы позволит создавать более эффективные и специализированные вихревые системы, адаптированные под конкретные задачи и условия эксплуатации. Это откроет новые перспективы для их использования в различных отраслях промышленности и техники [1,3]. Необходимо учитывать конфигурацию входного сопла, которая оказывает непосредственное влияние на формирование вихревого потока и, как следствие, на эффективность разделения тепла.

Классификация и анализ конструктивных элементов

Эффект разделения температуры, наблюдаемый в вихревых трубах, обусловлен сложным взаимодействием газодинамических явлений, возникающих благодаря особой конструкции устройства. Сжатый газ вводится в вихревую (или спиральную) камеру по касательной, что приводит к его интенсивному вращению и формированию вихревого потока. Этот вихрь движется вдоль внутренней поверхности основной трубы к ее горячему концу. Определенная доля газа выпускается через регулируемый клапан, расположенный на горячем конце. Остальная часть потока меняет направление и движется обратно к холодному концу трубы, формируя вторичный, внутренний вихрь, который коаксиально движется во внутренней области основного вихря. Вторичный вихрь выходит через диафрагму на холодном конце трубы, при этом его температура значительно ниже температуры исходного сжатого газа.

Важнейшими конструктивными элементами, оказывающими влияние на эффективность работы вихревой трубы, являются: входное сопло (или сопла),

вихревая камера, основная труба, а также устройства управления потоком на горячем и холодном концах. Форма и размеры входного сопла определяют начальную структуру вихря. Геометрия вихревой камеры влияет на интенсивность закрутки потока. Длина и диаметр основной трубы задают время контакта между горячим и холодным потоками. Регулирующие клапаны на выходах позволяют контролировать соотношение масс выходящих горячего и холодного потоков, тем самым оказывая влияние на температурный перепад. Более подробное рассмотрение этих аспектов представлено в работе [2].

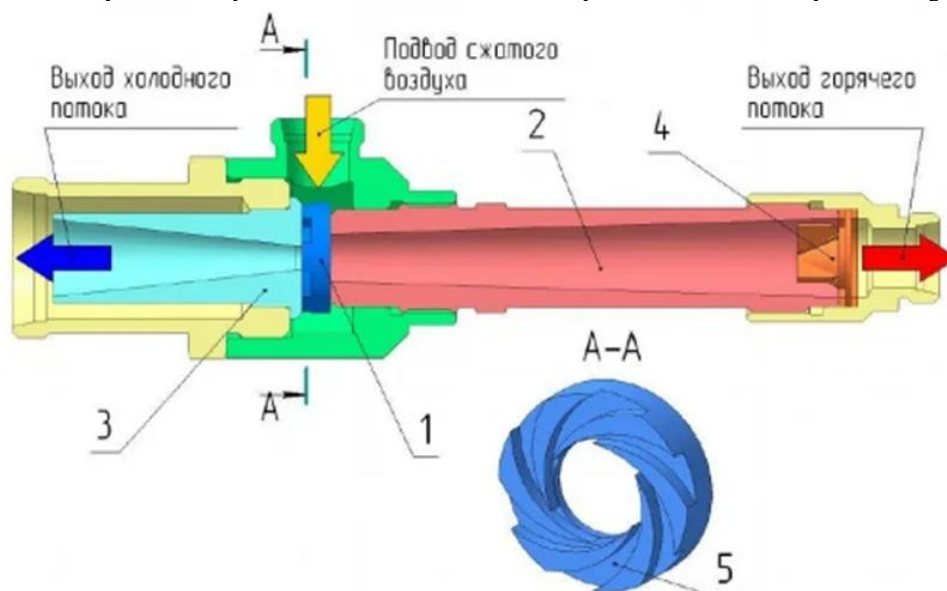


Схема вихревой трубки с многозаходной улиткой:

1 – сопловой ввод; 2 – камера энергоразделения; 3 – диффузор холодного потока;
4 – развихритель горячего потока; 5 – сопловой сужающийся канал.

Рис.1. – Схематичный разрез вихревой трубки на эффекте Ранка–Хилша современного вида

Входные сопла, через которые газ поступает в устройство, играют ключевую роль в формировании начальных характеристик вихревого потока. Количество сопел, их форма и точное расположение определяют ту интенсивность закрутки, с которой начинается движение газа. Например, переход от двух сопел к шести может способствовать созданию более равномерного и устойчивого вихря, что в свою очередь улучшает разделение газа по температуре. Тем не менее, увеличение числа сопел усложняет конструкцию всего устройства. На практике чаще всего используются два типа сопел: прямые и спиральные (или, как их еще называют, эвольвентные). Спиральные сопла позволяют газу более плавно входить в вихревую камеру. Это снижает гидравлические потери и увеличивает скорость вращения потока, что обычно приводит к большему перепаду температур между холодным и горячим потоками.

Основная трубка, внутри которой происходит разделение газа, также является важным элементом конструкции. Её геометрия, включая длину, диаметр и форму, оказывает существенное влияние на работу всего устройства. Важным параметром является соотношение длины трубки к её диаметру (L/D).

Существует оптимальное значение этого соотношения, которое обычно находится в пределах от 20 до 50. Если трубка слишком короткая, вихрь не успевает полностью сформироваться. Если же трубка слишком длинная, то возникают значительные потери энергии из-за трения. Помимо классических цилиндрических трубок, проводятся исследования с использованием конических конструкций, которые могут быть сходящимися или расходящимися. Например, трубка, расширяющаяся к горячему концу, может помочь стабилизировать внешний вихрь и повысить эффективность разделения газа.

Для управления потоком газа в вихревой трубе используются специальные регулирующие элементы. Диаметр отверстия диафрагмы, расположенной на холодном конце трубки, напрямую определяет долю холодного потока, то есть отношение массы холодного газа ко всей массе газа, поступающего в устройство. Уменьшение диаметра отверстия приводит к снижению температуры холодного потока, но при этом уменьшается и его объем. На горячем конце трубки часто устанавливается регулирующий клапан, имеющий коническую форму. Этот клапан создает противодавление, которое заставляет часть потока развернуться и двигаться в направлении холодного выхода. Регулируя этот клапан, можно изменять как температуру, так и массовую долю холодного потока [4].

Для достижения высокой эффективности работы вихревой трубы требуется высокая точность изготовления всех деталей, особенно в области сопел и центрального канала. Даже небольшие зазоры, шероховатости или несоосности деталей могут привести к дестабилизации вихря и снижению эффективности разделения газа по температуре.

Важными характеристиками материалов, используемых для изготовления вихревых труб, являются термостойкость и прочность. Трубки должны выдерживать высокое давление, значительные перепады температур и возможное загрязнение газовой среды. На практике для изготовления вихревых труб часто используются нержавеющая сталь, алюминиевые сплавы, а также различные инженерные полимеры и композитные материалы. Выбор конкретного материала зависит от условий эксплуатации и требований к эффективности устройства.

Ниже представлен краткий обзор влияния различных параметров вихревой трубы на её эффективность, а также рекомендации по их выбору.

Таблица 1.1 – Влияние конструктивных и эксплуатационных параметров на эффективность вихревой трубки

Параметр	Влияние на эффективность	Рекомендации / Примечания
Отношение длины к диаметру (L/D)	При слишком малом значении – нестабильность вихря; при большом – рост потерь	Оптимально: $L/D \approx 10-25$

Диаметр холодного выхода	Определяет массу и температуру холодного потока	При большом диаметре – выше расход, ниже ΔT
Диаметр горячего выхода	Влияет на противодавление и структуру вихря	Часто регулируется диафрагмой
Количество и угол тангенциальных сопел	Чем выше закрутка, тем больше температурное разделение	Обычно 2–4 сопла, угол 15–30°
Давление подаваемого газа	Прямо пропорционально ΔT между выходами	Эффективность увеличивается при $P > 4$ бар
Температура подаваемого газа	Влияет на абсолютные температуры выходов	Более тёплый вход – больше разность температур
Влажность и загрязнённость газа	Может снижать стабильность вихря и вызывать засор	Требуются фильтры и осушители
Материал корпуса и элементов	Влияет на теплопередачу, прочность и устойчивость	Нержавеющая сталь, алюминий, инженерные полимеры
Наличие стабилизирующих вставок	Повышает устойчивость вихря и ΔT	Используются в многоступенчатых и модернизированных моделях
Точность изготовления (шероховатость, соосность)	При отклонениях нарушается стабильность потока	Критична для промышленных применений

Влияние конструкции на производительность

Выбор оптимальной конструкции вихревой трубы тесно связан с конкретной задачей, так как именно она определяет необходимые параметры работы. Ключевые показатели, характеризующие эффективность, – это разность температур (между входным и выходным потоками) и производительность по холоду.

Когда приоритетна максимальная степень охлаждения: в тех случаях, когда необходимо получить максимально низкую температуру (например, в криогенных системах или для проведения научных экспериментов), предпочтение отдается конструкциям со спиральными соплами, оптимизированным соотношением длины к диаметру (L/D) и малой диафрагмой для холодного потока. В таких конструкциях доля холодного потока обычно невелика и составляет от 10% до 30%. Такое соотношение позволяет достичь экстремально низких температур, но ограничивает объем охлаждаемой среды.

Когда приоритетна максимальная мощность охлаждения: если задача состоит в отводе значительного количества тепла (например, при охлаждении литевых форм), конструкция должна обеспечивать большую долю холодного потока, примерно от 60% до 70%. Это достигается за счет увеличения диаметра

отверстия холодной диафрагмы. В этом случае температура холодного потока будет не столь низкой, как в первом варианте, но больший его объем обеспечит эффективный отвод тепла. Таким образом, выбор конструкции зависит от компромисса между требуемой температурой и объемом охлаждаемой среды [5].

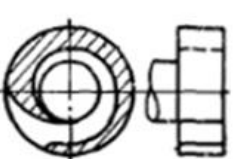
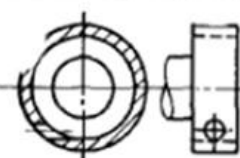
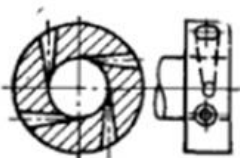
Конструкция и размеры исследованных вихревых труб							
№ трубы	Автор	Конструкция соплового входа	Диаметр вихревой трубы D , мм	Площадь соплового входа F_c , мм ²	Диаметр отверстия диафрагмы D_d , мм	Длина вихревой зоны, мм	Примечание
1	Р. Хилш		4,6	0,95	2,2	50	Круглое сопло
			9,6	4,15	4,3	50	
			17,6	13,2	6,5	50	
2	В. С. Мартыновский и В. П. Алексеев		4,1	0,8	1,5	67	Двухсопловый вход
			9,0	8,3	4,5	50	
			16,0	24,0	7,5	50	
			28,0	56,5	12,0	50	
3	А. П. Меркулов		10	7,6	4,5	9	Прямоугольное сопло
			16	18	7,2	9	
			20	30	9	9	
			25	47	11	9	
			33	84	14,5	9	
4	М. Г. Дубинский		32		25		
5	В. П. Хендал		10	7	6	4	Коническое сопло $\alpha=7^\circ$
6	С. Д. Фультон		6,1	0,8	1,75	33	Четырех- и шести-сопловые входы

Рис.2. – Таблица размеров вихревой трубки на эффекте Ранка–Хилша различных моделей, испытанных в экспериментах, и показавших хорошую эффективность

Заключение

Анализ конструкций вихревых трубок показывает, что их рабочие характеристики зависят от сложного взаимодействия их геометрических параметров. Несмотря на простоту конструкции, улучшение характеристик вихревой трубки – это сложная инженерная задача.

Улучшенные конструкции вихревых трубок могут принести ряд практических преимуществ:

1. Повышение энергосбережения: Оптимизированная геометрия позволяет получать большую разницу температур при том же давлении сжатого газа, что снижает расходы на эксплуатацию. Это достигается за счет более эффективного разделения потоков воздуха на горячий и холодный, а также уменьшения потерь энергии в процессе.

2. Расширение возможностей в использовании: Трубки с улучшенными характеристиками расширяют спектр их использования в разных технологических процессах, где ранее их применение было нерациональным. Это может включать в себя применение в системах охлаждения электроники, в медицинском оборудовании для локального охлаждения или нагрева, а также в качестве компонента систем кондиционирования.

3. Повышение стабильности: Отсутствие движущихся деталей в сочетании с хорошо продуманной конструкцией делает вихревую трубку долговечным решением для работы в промышленных условиях. Благодаря отсутствию трущихся поверхностей и сложной механики, вихревые трубки менее подвержены износу и поломкам по сравнению с традиционными системами охлаждения и нагрева.

В дальнейшем исследования могут быть направлены на применение новых материалов с низкой теплопроводностью для уменьшения нежелательного теплообмена внутри трубки. Также возможна разработка адаптивных вихревых трубок, способных менять свою геометрию в зависимости от условий работы для поддержания максимальной производительности. Такие умные трубки могли бы самостоятельно реагировать на изменения температуры и давления входящего воздуха, подстраивая параметры своей работы для достижения оптимального разделения потоков.

Таким образом, вихревая трубка остается интересным инструментом для решения задач локального нагрева и охлаждения в различных отраслях промышленности. Потенциал для развития этой технологии еще не исчерпан, и новые исследования могут привести к появлению еще более эффективных и универсальных устройств.

Список литературы

1. Смульский И. И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах / Институт криосферы земли - 2010. - 61–78 с.

2. Вихревая трубка на эффекте Ранка-Хилша. Какими законами физики объясняется выработка холода на ней? 2023. – URL: <https://habr.com/ru/articles/763048/>

3. Хазов Д. Е. Численное моделирование процессов энергоразделения в потоках сжимаемого газа / Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В.Ломоносова - 2022. – URL: https://jiht.ru/science/dissert-council/diss_texts/diss_Khazov_online2.pdf

4. Пиралишвили Ш. А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / УНЦП “Энергомаш” - 2010. - 307–393 с.

5. Eiamsa-ard S. & Promvonge P. Review of Ranque–Hilsch effects in vortex tubes. Renewable and Sustainable Energy Reviews - 2008. – URL: [Sci-Hub | 10.1016/j.rser.2007.03.006](https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.03.006)

ӘОЖ 53.08:378.147

АТОМДЫҚ ФИЗИКА МЕН АТОМ ЭНЕРГЕТИКАСЫНЫҢ ЗАМАНАУИ ДАМУЫ: ӘДІСТЕМЕЛІК ЖӘНЕ ҒЫЛЫМИ ТАЛДАУ

Уәлихан А.Ш.¹, Скаков М.К.², Канлы У.³, Раманкулов Ш.Ж.¹

¹ Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
Түркістан қ., Қазақстан

² Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ.,
Қазақстан

³ Гази университети, Анкара қ., Түркия
* e-mail: almagul.ualikhan@ayu.edu.kz

1 Кіріспе

Атомдық физика саласы Резерфордтың атом ядросын ашуынан бастау алып, бөлшектердің соқтығысуы мен бета-ыдырау және ядролық бөліну сияқты құбылыстарды зерттеу арқылы үздіксіз дамып келеді [1]. Беккерель мен Кюри тәжірибелері радиоактивті ыдырау процестерін микроскопиялық деңгейде түсінуге жол ашты [2]. 1911 жылғы Резерфордтың атақты алтын фольга тәжірибесі ядроны тығыз, протондарға бай орталық ретінде сипаттап, кейін 1932 жылы Чадвиктің нейтронды ашуы ядролық модельдерді жетілдіруге ықпал етті. Д.Иваненко мен В.Гейзенбергтің қабықша модельдері мен сұйықтық тамшысы моделі заряд тығыздығы, масса және ыдырау сипаттамалары секілді ядролық қасиеттерді түсіндірудің негізгі тұжырымдамалық негізін қалады [3], [4].

Қазіргі уақытта атомдық физика мен атом энергетикасының дамуы тек ядролық модельдермен шектелмей, кванттық механика, жоғары өнімді есептеу жүйелері, жасанды интеллект және машиналық оқыту әдістерін қолдану арқылы да кеңейіп келеді. Бұл бағыттар аса ауыр элементтердің қасиеттерін болжауда,

экзотикалық ядролардың тұрақтылығын бағалауда және энергия көздерінің қауіпсіздігі мен тиімділігін арттыруда жаңа мүмкіндіктер ашады. Сонымен қатар, атом энергетикасы жаһандық энергетикалық қауіпсіздікті қамтамасыз ету, көміртек ізін азайту және жасыл технологияларды енгізу тұрғысынан стратегиялық маңызға ие болып отыр.

Зерттеудің мақсаты – атомдық физика мен атом энергетикасының заманауи даму бағыттарын әдістемелік және ғылыми тұрғыдан талдау, олардың білім беру, ғылыми зерттеу және энергетикалық индустриядағы рөлі мен маңызын айқындау. Бұл мақалада атомдық модельдерді жетілдіру, жаңа теориялық тәсілдер мен эксперименттік әдістерді пайдалану талқылай келе, STEM және цифрлық технологияларды қолданудың тиімділігіне назар аудару.

2 Әдебиеттік шолу

Соңғы онжылдықтарда атомдық және ядролық физикада модельдерді жетілдіру бағытында бірқатар ғылыми ілгерілеулер байқалды. Бұл жетістіктер кластерлік эмиссиялар мен ядроның деформациясы ыдырау процестеріне қалай әсер ететінін түсіндіруге мүмкіндік берді [5]. Мұндай модельдер альфа және протондық ыдырау сияқты процестерді, әсіресе экзотикалық және аса ауыр ядролар үшін, сипаттауда шешуші рөл атқарады [6]. Ядролық деформацияның – төрт полюсті және гексадекапольді моменттерінің – ықпалы ядролық және кулондық потенциалдарды өзгертіп, тосқауылдан өту ықтималдығын және жартылай ыдырау кезеңін (half-life) есептеуге түзетулер енгізеді [3].

Протондық тамшы шегіне жақын орналасқан ядролардағы протондық радиоактивтілік, сондай-ақ альфа және кластерлік ыдырау сияқты экзотикалық құбылыстардың ашылуы ядролық тұрақтылықты зерттеуде ерекше мәнге ие [7], [8]. Мұндай кластерлік ыдырауларда ядро қабықшасының әсері (shell effect) айқын байқалып, Q-мәнге ықпал етеді және жартылай ыдырау кезеңін қысқартады [9]. Альфа ыдыраудың классикалық процесі аса ауыр элементтердің құрылымын және «тұрақтылық аралын» зерттеуде негізгі құрал болып қала береді [10].

Соңғы жылдары Жүйелендірілген Сұйықтық Тамшысы Моделі (Generalized Liquid Drop Model) proximity-эффектілерді және қабықша түзетулерін ескере отырып, альфа-ыдырау жартылай кезеңдерін дәл болжауға мүмкіндік береді [11]. Бұл модельдер альфа-бөлшектің алдын ала түзілу ықтималдығын есепке алып, экзотикалық ядролардағы қабықша әсерін анық көрсетуге жағдай жасайды [12]. Сонымен бірге Калифорний сияқты изотоптар үшін деформация әсерін есептеу альфа және кластерлік радиоактивтілікті болжауда дәлдікті арттырады [13].

Теориялық болжауларды тәжірибелік деректермен салыстыру арқылы модельдердің дұрыстығын тексеру және жетілдіру аса маңызды. Бұл әсіресе аса ауыр ядролардың ыдырау тізбектерін зерттегенде айқын көрінеді, өйткені мұндай аймақтағы эксперименттік деректер аз және модельдер арасында айырмашылық көп [14], [15]. Осылайша, қазіргі ядролық физикада альфа, протон және

кластерлік ыдыраулармен қатар өздігінен бөліну сияқты әртүрлі ыдырау режимдерін біртұтас сипаттайтын теориялық негіздерді дамытуға айрықша көңіл бөлінуде [16], [17], [18].

3 Әдістеме

Бұл зерттеу атомдық физика мен атом энергетикасының заманауи даму бағыттарын кешенді түрде талдауға бағытталған теориялық-аналитикалық сипаттағы жұмыс болып табылады. Әдіс ретінде ғылыми жарияланымдарды жүйелі талдау, салыстырмалы әдіс және мазмұндық талдау (контент-анализ) қолданылды. Соңғы онжылдықтардағы ядролық модельдерге, альфа, протондық және кластерлік ыдырауларға арналған теориялық еңбектер, сондай-ақ атомдық спектроскопия мен заманауи аналитикалық әдістер (AAS және LIBS) жөніндегі жарияланымдар зерттелді. Жиналған деректер негізінде ядролық модельдердің тарихи эволюциясы, жаңа теориялық тәсілдердің даму деңгейі және олардың практикалық қолданысы бағаланды.

4 Нәтижелер

Жүргізілген зерттеу нәтижесінде атомдық және ядролық физикада қолданылатын модельдердің тарихи эволюциясы мен қазіргі заманғы жетілдірілген нұсқалары салыстырмалы түрде айқындалды. Бұрынғы модельдер көбіне классикалық тәсілдерге негізделсе, қазіргі модельдер кванттық механика, proximity-потенциалдар және ядролық деформация сияқты параметрлерді кешенді түрде ескеретіндігімен ерекшеленеді.

Төмендегі кестеде атомдық және ядролық модельдердің негізгі айырмашылықтары көрсетіліп, олардың ғылыми дамуы мен қолдану ауқымы салыстырмалы түрде берілген. Бұл талдау қазіргі заманғы теориялық үлгілердің экзотикалық және аса ауыр ядролардың қасиеттерін дәлірек сипаттап, эксперименттік деректермен жоғары үйлесім беретінін көрсетеді.

Кесте 1. Атомдық және ядролық модельдер: Ескі және Жаңа модельдерді салыстыру

Критерий	Ескі модельдер	Жаңа (заманауи) модельдер
Теориялық негіз	Классикалық механика және қарапайым ядролық модельдер (сұйықтық тамшысы, Бор моделі, Вайола–Сиборг формуласы)	Кванттық механика, Жалпыландырылған сұйықтық тамшысы моделі (GLDM), проксимити-потенциалдар, кванттық туннельдеу
Ескерілетін параметрлер	Тек орташа ядролық потенциал, Q-мән және тосқауыл биіктігі	Қабықша түзетулері, ядролық деформация (төрт полюсті, гексадекапольді), альфа-бөлшек алдын ала түзілу ықтималдығы, масса және заряд асимметриясы

Ыдырау процестерін сипаттау	Әр ыдырау түріне жеке формула (альфа, протон, кластер бөлек қаралады)	Альфа, протон, кластерлік ыдыраулар мен өздігінен бөлінуді біртұтас формализммен сипаттау
Мақсатты аймақ	Негізінен тұрақты немесе аз экзотикалық ядролар	Экзотикалық және аса ауыр (суперауыр) ядролар, протон тамшысы шегіне жақын аймақтар
Есептік әдістер	Аналитикалық жуықтау, қарапайым формулалар	Кванттық механикалық туннельдеу, жартылай аналитикалық әдістер, машиналық оқыту мен көппараметрлі регрессия
Нәтижелердің дәлдігі	Жартылай ыдырау кезеңдерін жалпы бағалау	Жартылай ыдырау кезеңдерін эксперименттік деректерге жақын дәл болжау
Жаңашылдығы	Классикалық түсінікпен шектелген	Машиналық оқыту, жоғары өнімді есептеу, proximity-эффектілер және shell-effect толығырақ есептеледі

Жүргізілген зерттеу нәтижесінде атомдық және ядролық физикада қолданылатын модельдердің тарихи эволюциясы мен қазіргі заманғы жетілдірілген нұсқалары салыстырмалы түрде айқындалды. Бұрынғы модельдер көбіне классикалық тәсілдерге негізделсе, қазіргі модельдер кванттық механика, proximity-потенциалдар және ядролық деформация сияқты параметрлерді кешенді түрде ескеретіндігімен ерекшеленеді. Бұл тәсілдер экзотикалық және аса ауыр ядролардың қасиеттерін дәлірек сипаттап, эксперименттік деректермен жоғары үйлесім беретінін көрсетті.

Сонымен қатар зерттеу барысында атомдық спектроскопиядағы негізгі бағыттар мен тарихи даму үрдістері де айқындалды. Атомдық абсорбциялық спектроскопия (AAS) шамамен 70 элементті анықтауға мүмкіндік беретін жоғары дәлдігі мен сезімталдығымен ерекшеленетіні анықталды [19], [20]. Бұл әдіс медициналық зерттеулерде, металлургияда және қоршаған ортаны бақылауда кеңінен қолданылады [21]. Атомдардың резонанстық сәулеленуін зерттеу арқылы AAS жеке атомдардың мінез-құлқы туралы құнды ақпарат береді [22].

Сондай-ақ заманауи лазерлік спектроскопия әдістерінің бірі — Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) — соңғы жылдары тез дамыды. Бұл әдіс түрлі үлгілерде (қатты, сұйық, газ) көп элементті талдауды жылдам әрі in-situ орындауға мүмкіндік береді және оның механизмдері туралы 1500-ден астам ғылыми жарияланымдар бар [23], [24]. LIBS-тің жылдамдығы, сенімділігі және көп элементті талдау қабілеті оны күрделі материалдарды зерттеуде, экологиялық мониторинг пен өнеркәсіптік сапа бақылауында маңызды құралға айналдырды.

Осылайша, зерттеу нәтижелері ядролық модельдердің эволюциясын ғана емес, сондай-ақ атомдық спектроскопияның — дәстүрлі әдістерден бастап LIBS сияқты жаңа технологияларға дейін — қарқынды дамуын да көрсетеді. Бұл екі бағыт та атомдық физика мен атом энергетикасының заманауи ғылыми-технологиялық деңгейін айқындап, жаңа әдістемелік және қолданбалы зерттеулерге жол ашады.

Жүргізілген зерттеуде ескі және жаңа ядролық модельдер салыстырылып, олардың негізгі айырмашылықтары мен ғылыми дамуы айқындалды. Осы салыстыру нәтижесінде STEM және цифрлық технологиялар арқылы оқытудың тиімділігі де нақтыланды: жаңа модельдер мен есептік әдістерді виртуалды зертханалар, 3D модельдеу, симуляциялар және интерактивті бағдарламалар арқылы көрсету студенттердің күрделі ұғымдарды тереңірек түсінуіне, теорияны тәжірибемен ұштастыруына және ғылыми ойлау дағдыларын дамытуына мүмкіндік береді. Бұл тәсіл атомдық физика мен атом энергетикасын заманауи талаптарға сай оқыту мен зерттеуде сапалы жаңа деңгей қалыптастырады.

5 Қорытынды

Жүргізілген зерттеу нәтижесінде атомдық физика мен атом энергетикасындағы ескі және жаңа модельдердің айырмашылықтары мен эволюциясы анықталды. Бұрынғы модельдер ядроны классикалық тұрғыдан сипаттап, альфа, протон және кластерлік ыдырауларды жеке қарастырса, қазіргі модельдер ядролық деформация, қабықша түзетулері және альфа-бөлшектің алдын ала түзілу ықтималдығы сияқты факторларды кешенді түрде ескеріп, ыдырау процестерін біртұтас сипаттайды. Бұл олардың эксперименттік деректермен үйлесімділігін арттырып, суперауыр элементтердің қасиеттерін дәлірек болжауға мүмкіндік береді.

Сондай-ақ STEM және цифрлық технологияларды қолдану осы модельдердің күрделі тұстарын визуалды және қолжетімді түрде түсіндіруге жағдай жасайды. Бұл тәсілдер теорияны тәжірибемен ұштастыруға және білімді жеңіл меңгеруге көмектесетін қосымша құрал ретінде қарастырылады.

Қорыта айтқанда, зерттеу атомдық физика мен атом энергетикасындағы модельдердің тарихи дамуы мен қазіргі жетілдірілген нұсқаларын салыстыра талдап, олардың ғылыми маңызын және оқу процесінде қолдану аясын айқындап берді.

Әдебиеттер тізімі

1. Souza, M. A. M., & Dantas, J. D. (2009). Nuclear phenomenology: A conceptual proposal for high school teaching. arXiv (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arxiv.0905.2584>
2. Cherry, S. R., Sorenson, J. A., & Phelps, M. E. (2012). Modes of radioactive decay. In Elsevier eBooks (p. 19). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-1-4160-5198-5.00003-4>

3. Naveya, G., Philominraj, S. I. A., & Stephen, A. (2018). Study on alpha decay chains of $Z = 122$ superheavy nuclei with deformation effects and Langer modification. arXiv (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.04421>
4. Hirsch, J. G., & Padilla-Rodal, E. (2010). Nuclear physics: A short course. AIP Conference Proceedings, 3. <https://doi.org/10.1063/1.3495651>
5. Majekodunmi, J. T., Khazali, K. A. M., Bhuyan, M., Abdullah, N., Kumar, R., Yahya, W. A., & Ochala, I. (2024). Exploring the systematics of cluster decay half-lives in heavy actinides within the range $234 < A < 252$. Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology, 49(1), 183. <https://doi.org/10.37934/araset.49.1.183193>
6. Xiao, Q., Cheng, J.-H., Wang, B., Xu, Y.-Y., Zou, Y., & Yu, T.-P. (2023). Half-lives for proton emission and α decay within the deformed Gamow-like model. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 50(8), 085102. <https://doi.org/10.1088/1361-6471/acdfcb>
7. Adel, A., Mahmoud, K. H., & Taha, H. A. (2024). Exploring the competition between α -decay and proton radioactivity: A comparative study of proximity potential formalisms. arXiv (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.06069>
8. Sahu, B., Paira, R., & Rath, B. (2013). General decay law for emission of charged particles and exotic cluster radioactivity. Nuclear Physics A, 908, 40. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2013.04.002>
9. Gao, Y., Cui, J., Wang, Y., & Gu, J. (2020). Cluster radioactivity of neutron-deficient nuclei in trans-tin region. Scientific Reports, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65585-x>
10. Qian, Y., & Ren, Z. (2014). Half-lives of α decay from natural nuclides and from superheavy elements. Physics Letters B, 738, 87. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2014.09.024>
11. Dasgupta-Schubert, N., & Reyes, M. (2007). The generalized liquid drop model alpha-decay formula: Predictability analysis and superheavy element alpha half-lives. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 93(6), 907. <https://doi.org/10.1016/j.adt.2007.06.006>
12. Rui-Wang, Wang, R., Qian, Y., & Ren, Z. (2017). Signatures of shell evolution in alpha decay across the $N = 126$ shell closure. Chinese Physics C, 41(6), 064103. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/41/6/064103>
13. Santhosh, K. P., & Biju, R. K. (2013). Stability of 248–254Cf isotopes against alpha and cluster radioactivity. Annals of Physics, 334, 280. <https://doi.org/10.1016/j.aop.2013.04.008>
14. Kowal, M., & Łojewski, Z. (2003). The alpha decay of deformed superheavy elements. arXiv (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arXiv.0304029>
15. Silișteanu, I., & Anghel, C. I. (2017). Systematics of α -decay and spontaneous fission half-lives of super-heavy nuclei. AIP Conference Proceedings, 1792, 020011. <https://doi.org/10.1063/1.4972359>
16. Bello, F., Aguilera, J., & Rodríguez, O. (2011). Alpha decay of superheavy nuclei. arXiv (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1102.2803>

17. Heßberger, F. P. (2021). Some aspects on identification, decay properties and nuclear structure of the heaviest nuclei. arXiv (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.08793>
18. Mavrodiev, S. Cht., & Deliyergiyev, M. (2016). Unified description of the proton, alpha, cluster decays and spontaneously fissions half-life. arXiv (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arxiv.1608.00701>
19. Rafiq, N., & Sait, S. (2021). Main research trends in atomic spectroscopy: A qualitative and quantitative analysis of N-classical publications. Spectroscopy. <https://doi.org/10.56530/spectroscopy.rt7567q5>
20. Zettner, A. (1964). Principles and applications of atomic absorption spectroscopy: Entry into medical and service laboratories. Advances in Clinical Chemistry, 1. Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/s0065-2423\(08\)60372-8](https://doi.org/10.1016/s0065-2423(08)60372-8)
21. Еськина, И. В., Baranovskaya, V. B., Karpov, Yu. A., & Filatova, D. G. (2020). Atomic absorption spectroscopy in metallurgy and environmental monitoring. Russian Chemical Bulletin, 69(1), 1. Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/s11172-020-2718-6>
22. Mohammed, K. (2021). Resonant radiation in atomic absorption spectroscopy: Fundamentals and applications. European Journal of Engineering and Technology Research, 6(7), 48. <https://doi.org/10.24018/ejeng.2021.6.7.2639>
23. Zhang, X., Chen, J., Wang, Y., & Li, H. (2021). Advances in laser-induced breakdown spectroscopy: Multi-element and in-situ analysis. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 181, 106218. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2021.106218>
24. Pedarnig, J. D., Trautner, S., Grünberger, S., Giannakaris, N., Eschlböck-Fuchs, S., & Hofstadler, J. (2021). Laser-induced plasma formation and evolution: Mechanisms and applications. Applied Sciences, 11(19), 9274. <https://doi.org/10.3390/app11199274>

HYDROGEN AS THE KEY TO GREEN ENERGY: OPPORTUNITIES, CHALLENGES AND TECHNOLOGICAL BARRIERS

Małgorzata Rutkowska-Gorczyca

Faculty of Mechanical Engineering, Wrocław University of Science and Technology,
Wyb. Wyspińskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland
malgorzata.rutkowska-gorczyca@pwr.edu.pl

Abstract

In the face of the global energy transition, green hydrogen is seen as a key energy vector due to its purity and versatility. This review article synthesizes the current state of knowledge, analyzing the fundamental opportunities, challenges, and technological barriers related to implementing a hydrogen economy. The literature analysis indicates hydrogen's enormous potential in decarbonizing sectors that are difficult to electrify,

such as heavy industry (steel and ammonia production) and long-distance transport, as well as its strategic role as a large-scale energy storage system stabilizing renewable energy grids.

However, the realization of this vision is hampered by significant barriers: economic (high production costs), infrastructural (lack of transmission networks), regulatory, and technological. Key technological barriers include the low durability and high cost of electrolyzers and fuel cells, resulting from their reliance on rare precious metals. The paper demonstrates that these barriers create a complex system of interconnections. Breaking the technological and economic deadlocks requires coordinated policy action, including strategic investments and the creation of international standards, to fully unleash the potential of green hydrogen in a sustainable energy system. This paper outlines the key challenges standing in the way of full hydrogen transformation.

Keywords: green hydrogen, hydrogen economy, energy transition, electrolyzers, fuel cells, hydrogen storage, decarbonization

1. Introduction

Hydrogen is seen as a fundamental element of the future energy transition for two main reasons: purity and versatility. Unlike fossil fuels, its use in fuel cells to produce electricity generates only water and heat, eliminating greenhouse gas emissions and air pollutants. Its versatility lies in the fact that it can be produced from various sources (including renewables), stored on a large scale and for long periods, and used in numerous economic sectors – from transport and industry to energy and heating. (Hordvei et al., 2024; Salmelin et al., 2025; van Greevenbroek et al., 2025; Vilbergsson et al., 2023). Hydrogen can be produced from surplus renewable energy (wind, solar), stored long-term (unlike batteries), and then used to power heavy-duty transport (trucks, ships), decarbonize industry (e.g., steel and ammonia production), and stabilize the power grid.

While most hydrogen is currently produced from fossil fuels (so-called gray hydrogen), the future belongs to green hydrogen, produced by electrolysis of water powered by renewable energy sources. However, processes such as electrolysis, photolysis, and biological production mean that the development of these methods will enable the creation of a fully emission-free energy cycle. In this approach, hydrogen becomes a carrier that "stores" clean renewable energy, enabling its transport and use anywhere and anytime. "Green" hydrogen, produced from water and solar, wind, or geothermal energy, converts back to water after being consumed in a fuel cell. This makes it an ultimately clean and renewable energy source. This work strongly supports the argument that investments in green hydrogen are essential to achieving global climate goals, as it allows for the decarbonisation of hard-to-electrify sectors (Dincer, 2012; Gajdzik et al., 2024; Zhang et al., 2024). The paper aims to identify and synthesize the current state of knowledge on the opportunities, challenges and technological barriers related to the implementation of green hydrogen.

2. Opportunities and Potential of a Hydrogen-Based Economy

Green hydrogen is a key decarbonization solution for heavy industry and transportation—sectors where direct electrification is ineffective. In the steel industry, it replaces coking coal in the direct reduction of iron ore, enabling the production of "green steel" without CO₂ emissions. It is also an essential raw material for the synthesis of "green ammonia," crucial for sustainable fertilizers and as an energy carrier (Armijo & Philibert, 2020; Rumsa et al., 2025). In heavy-duty transport, hydrogen-powered fuel cells (FCEVs) offer long range and rapid refueling for trucks, ships, and aircraft, eliminating the limitations of battery technology in these applications.

Hydrogen plays a key role in energy storage and energy security, addressing the intermittency of renewable energy sources (RES). During periods of solar or wind overproduction, the excess power is used through electrolysis to produce green hydrogen (Power-to-Gas). Unlike batteries, this hydrogen can be stored in large quantities and for long periods—from days to entire seasons (Algburi et al., 2025; Götz et al., 2016; Parra et al., 2019). When energy demand increases or renewable energy production decreases, the stored hydrogen is converted back into electricity in fuel cells or turbines (Gas-to-Power), thus stabilizing the grid. This closed, domestic energy cycle significantly increases energy security and independence by reducing dependence on imported fossil fuels. It enables diversification of the energy mix and builds the system's resilience to external geopolitical shocks and price fluctuations in global markets.

3. Main Challenges and Barriers to Implementing the Hydrogen Strategy

Despite its enormous potential, the implementation of a hydrogen economy faces three fundamental barriers. The first is economic. Currently, the cost of producing green hydrogen through electrolysis is significantly higher than that of grey hydrogen, produced from fossil fuels. Furthermore, building the entire ecosystem – from electrolyzers, through storage facilities, to dedicated transport infrastructure – requires massive, multi-billion capital investments. The second obstacle is infrastructure. There is a lack of dedicated hydrogen transmission networks, and the adaptation of existing gas pipelines is limited due to hydrogen embrittlement, the degradation of steel in contact with hydrogen, which poses a safety risk (Algburi et al., 2025; Alreshidi et al., 2025; Parra et al., 2019). Finally, there are regulatory and social challenges. The lack of uniform international safety and technical standards hampers investment. It's crucial for governments to create a clear legal framework and support mechanisms. Building public acceptance and addressing safety concerns is equally crucial to stimulate demand for this clean fuel.

4. Technological Barriers and Research Directions

Overcoming technological barriers is crucial for the hydrogen economy and focuses on three areas. In green hydrogen production, the main challenge is reducing costs and increasing the durability of electrolyzers (Amini Horri & Ozcan, 2024).

Technologies like PEM, while efficient, rely on expensive and rare noble metals (platinum, iridium), which stimulates research into new, less expensive catalytic materials. Storage is a critical barrier. Due to hydrogen's low density, compressing it at high pressure or liquefying it is an energy-intensive process. Alternative methods, such as storage in solids (metal hydrides), are safer but still in the research phase, grappling with weight and cost issues (Zhang et al., 2024b). In terms of application, the main obstacle to commercializing PEMFC fuel cells is the high cost and limited lifetime resulting from the use of platinum catalysts. Therefore, intensive research is focusing on reducing the platinum content and developing more durable membranes (Wang et al., 2011).

5. Discussion and Summary

Analysis of the collected information clearly indicates a dichotomy between the enormous opportunities presented by green hydrogen and the complex, multi-level barriers hindering its implementation. These opportunities – decarbonization of industry and transport, long-term storage of energy from renewable sources, and strengthening energy security – are the foundation of a future, sustainable economy. However, their realization is hindered by a network of interconnected challenges. The interconnections between barriers are evident. Technological barriers, such as the high cost of electrolyzers and fuel cells resulting from the reliance on precious metals, directly translate into a fundamental economic challenge – the low competitiveness of green hydrogen. Similarly, the technological problem with efficient storage (low density) exacerbates the infrastructure barrier, necessitating the construction of costly, dedicated transmission networks, as the adaptation of existing gas pipelines is limited due to hydrogen fragility.

When identifying the most critical obstacles, it is important to note the trade-off between cost and scale. Without a significant reduction in production costs, infrastructure investments are too risky. On the other hand, without a developed infrastructure and market, it is impossible to achieve economies of scale that would reduce costs. In this context, the role of policy, subsidies, and international cooperation becomes absolutely crucial. Breaking this impasse requires intervention in the form of long-term strategies, support mechanisms (e.g., contracts for difference) that will bridge the initial cost gap, and funding for research into new materials. A clear regulatory framework and international standards are essential to reduce risk for private investors and enable the creation of a global market. Without proactive policy, the opportunities offered by hydrogen will remain merely potential.

Bibliography

1. Algburi, S., Munther, H., Al-Dulaimi, O., Fakhruldeen, H. F., Sapaev, I. B., Seedi, K. F. K. Al, Khalaf, D. H., Jabbar, F. I., Hassan, Q., Khudhair, A., & Nakimera, G. (2025). Green Hydrogen Role in Sustainable Energy Transformations: A Review. *Results in Engineering*, 26, 105109. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2025.105109>

2. Alreshidi, M. A., Yadav, K. K., Shoba, G., Gacem, A., Padmanabhan, S., Ganesan, S., Gunganathan, L., Bhutto, J. K., Saravanan, P., Fallatah, A. M., Abo El-Khair, M. A., Almalawi, J. F., Alam, M. W., Kavitha, C., Tamizhdurai, P., & Subramani, A. (2025). Hydrogen in transport: a review of opportunities, challenges, and sustainability concerns. In *RSC Advances* (Vol. 15, Issue 29, pp. 23874–23909). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d5ra02918j>
3. Amini Horri, B., & Ozcan, H. (2024). Green hydrogen production by water electrolysis: Current status and challenges. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 47, 100932. <https://doi.org/10.1016/J.COOGSC.2024.100932>
4. Armijo, J., & Philibert, C. (2020). Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(3), 1541–1558. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.11.028>
5. Dincer, I. (2012). Green methods for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2), 1954–1971. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2011.03.173>
6. Gajdzik, B., Wolniak, R., Nagaj, R., Žuromskaitė-Nagaj, B., & Grebski, W. W. (2024). The Influence of the Global Energy Crisis on Energy Efficiency: A Comprehensive Analysis. *Energies*, 17(4). <https://doi.org/10.3390/en17040947>
7. Götz, M., Lefebvre, J., Mörs, F., McDaniel Koch, A., Graf, F., Bajohr, S., Reimert, R., & Kolb, T. (2016). Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. *Renewable Energy*, 85, 1371–1390. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2015.07.066>
8. Hordvei, E., Hummelen, S. E., Petersen, M., Backe, S., & del Granado, P. C. (2024). *From Policy to Practice: Upper Bound Cost Estimates of Europes Green Hydrogen Ambitions*. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2025.100206>
9. Parra, D., Valverde, L., Pino, F. J., & Patel, M. K. (2019). A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 279–294. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.11.010>
10. Rumsa, M., John, M., & Biswas, W. (2025). Global steel decarbonisation roadmaps: Near-zero by 2050. *Environmental Impact Assessment Review*, 112, 107807. <https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2025.107807>
11. Salmelin, M., Hyypiä, J., Satymov, R., Galimova, T., Talus, K., Karjunen, H., Lassila, J., & Breyer, C. (2025). Exploring the Shetland Islands' Potential as a Green e-Hydrogen Export Hub for Europe. *Energy*, 138682. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138682>
12. van Greevenbroek, K., Schmidt, J., Zeyringer, M., & Horsch, A. (2025). Little to lose: The case for a robust European green hydrogen strategy. *Joule*, 9(7). <https://doi.org/10.1016/j.joule.2025.101974>
13. Vilbergsson, K. V., Dillman, K., Emami, N., Ásbjörnsson, E. J., Heinonen, J., & Finger, D. C. (2023). Can remote green hydrogen production play a key role in decarbonizing Europe in the future? A cradle-to-gate LCA of hydrogen production in

Austria, Belgium, and Iceland. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(46), 17711–17728. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.081>

14. Wang, Y., Chen, K. S., Mishler, J., Cho, S. C., & Adroher, X. C. (2011). A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research. *Applied Energy*, 88(4), 981–1007. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2010.09.030>

15. Zhang, L., Jia, C., Bai, F., Wang, W., An, S., Zhao, K., Li, Z., Li, J., & Sun, H. (2024a). A comprehensive review of the promising clean energy carrier: Hydrogen production, transportation, storage, and utilization (HPTSU) technologies. *Fuel*, 355, 129455. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.129455>

16. Zhang, L., Jia, C., Bai, F., Wang, W., An, S., Zhao, K., Li, Z., Li, J., & Sun, H. (2024b). A comprehensive review of the promising clean energy carrier: Hydrogen production, transportation, storage, and utilization (HPTSU) technologies. *Fuel*, 355, 129455. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.129455>

СЕКЦИЯ 4 «ПРОМЫШЛЕННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»

УДК 628.5 (075.8)

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ СКЛАДСКИХ ПОМЕЩЕНИЙ С УЧЕТОМ УЛУЧШЕНИЙ УСЛОВИЙ ТРУДА

Абикенова А.А., * Амирканова Г.Е.

НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека
Даукеева», Казахстан, г. Алматы,
g.amirkanova@aues.kz

Введение

Развитие логистической инфраструктуры в Республике Казахстан требует не только внедрения современных технических решений, но и соблюдения принципов устойчивого развития, охватывающих экономические, экологические и социальные аспекты.

Одним из важнейших направлений устойчивости является обеспечение безопасных и комфортных условий труда, особенно в таких интенсивно используемых зонах, как склады.

Складские помещения зачастую характеризуются повышенным уровнем опасности из-за эксплуатации техники, ручного труда, высокой плотности хранения грузов и отсутствия надлежащего микроклимата. В то же время устойчивое развитие складов предполагает внедрение инновационных подходов к проектированию, эксплуатации и модернизации зданий и оборудования, а также соблюдение законодательства в области охраны труда.

Методы исследования автора

В работе автором исследованы методы системного анализа, сравнительного анализа международных стандартов устойчивого строительства (BREEAM, LEED, DGNB), а также расчетные методы оценки экономической эффективности энергосберегающих мероприятий и практик по улучшению условий труда. Используются официальные нормативные документы Республики Казахстан и международные стандарты в области охраны труда и устойчивости.

Научные результаты по устойчивому развитию складской инфраструктуры.

Устойчивое развитие в логистике предполагает создание таких складских помещений, которые одновременно обеспечивают эффективность хранения и перемещения товаров, безопасность персонала и минимальное воздействие на

окружающую среду. На международном уровне устойчивость складов регулируется стандартами экологического строительства, такими как BREEAM [8], LEED [7], DGNB, однако в Республике Казахстан вопросы устойчивого развития также находят отражение в национальных стратегиях, например в Концепции перехода к «зеленой» экономике. Складские объекты играют значимую роль в структуре производственной и торговой логистики. Их развитие должно учитывать принципы энергоэффективности, минимизации отходов, эргономики и охраны труда.

Применение энергосберегающих технологий (LED-освещение, системы автоматизации вентиляции), использование вторичных строительных материалов, а также рациональная организация рабочих зон — все это способствует устойчивости и снижению производственных рисков.

Проблематика условий труда на складах.

Складские помещения, особенно на старых предприятиях, часто не соответствуют современным требованиям охраны труда и гигиены. Проблемами являются: высокая загазованность, шум, неудовлетворительный микроклимат, недостаточное освещение, неправильная организация рабочих мест. Согласно статье 181 Трудового кодекса Республики Казахстан, работодатель обязан обеспечить безопасные условия труда, а также провести специальную оценку условий труда. Кроме того, СанПиН [2] № ҚР ДСМ-100/2020 «Санитарные правила и нормы по условиям труда работников» устанавливает нормативы по уровню освещенности, температурному режиму и уровню шума.

Невыполнение требований охраны труда в складской зоне может привести к профессиональным заболеваниям, травматизму и снижению производительности. Внедрение стандартов ISO 45001 [5]:2018 по системе менеджмента охраны труда может существенно улучшить организацию труда и повысить общий уровень безопасности.

Взаимосвязь между устойчивым развитием и улучшением условий труда.

Интеграция принципов устойчивого развития в проектирование и эксплуатацию складов напрямую способствует улучшению условий труда. Экологически чистые материалы снижают воздействие вредных веществ, а энергоэффективные системы вентиляции и отопления улучшают микроклимат.

Использование автоматизированных складских систем снижает физическую нагрузку на работников и минимизирует контакт с опасными зонами. Освещение с учетом биологических ритмов человека способствует улучшению самочувствия и снижению утомляемости.

Таким образом, устойчивое развитие неразрывно связано с охраной труда. Улучшение условий труда не только отвечает требованиям законодательства, но и ведет к экономическим преимуществам — снижению текучести кадров, уменьшению числа несчастных случаев и повышению эффективности.

Устойчивое развитие складских помещений предполагает комплексный подход к проектированию, эксплуатации и модернизации, включающий не

только экономическую эффективность и экологическую безопасность, но и заботу о здоровье и благополучии работников.

Создание безопасной и комфортной рабочей среды способствует снижению уровня производственного травматизма, повышению производительности труда, а также укреплению репутации предприятия.

В Республике Казахстан значительное внимание уделяется охране труда и экологии, что отражается в соответствующих нормативных документах. Тем не менее, необходима активизация процессов модернизации складской инфраструктуры с учетом принципов устойчивого развития и международных стандартов.

Практическое применение изложенных рекомендаций может стать основой для трансформации складской логистики в направлении экологической и социальной ответственности.

Сравнительный анализ международных стандартов устойчивого строительства.

Для оценки устойчивости складских и иных промышленных зданий на международном уровне применяются различные стандарты, наиболее распространёнными из которых являются BREEAM [7] (Великобритания), LEED [8] (США) и DGNB [9] (Германия). Каждый из них имеет свои подходы к оценке энергоэффективности [6], экологичности, условий труда и жизненного цикла зданий.

Ниже автором приведена сравнительная таблица 1, отражающая особенности указанных стандартов.

Таблица 1 - Сравнительная таблица, отражающая особенности указанных стандартов

Критерий	BREEAM	LEED	DGNB	Комментарий
Страна происхождения	Великобритания	США	Германия	
Метод оценки	Многоуровневая	Балльная система	Комплексная (LCA)	DGNB учитывает весь жизненный цикл
Энергоэффективность	Высокая	Очень высокая	Очень высокая	Все стандарты делают на этом акцент
Условия труда	Ограничено	Частично	Учитываются подробно	DGNB фокусируется на комфорте человека
Глобальное распространение	>70 стран	>160 стран	Европа	LEED — самый глобальный

Автором проведено исследование на рисунке 1, а именно представлено сравнение фокусов каждого из стандартов по четырём направлениям.

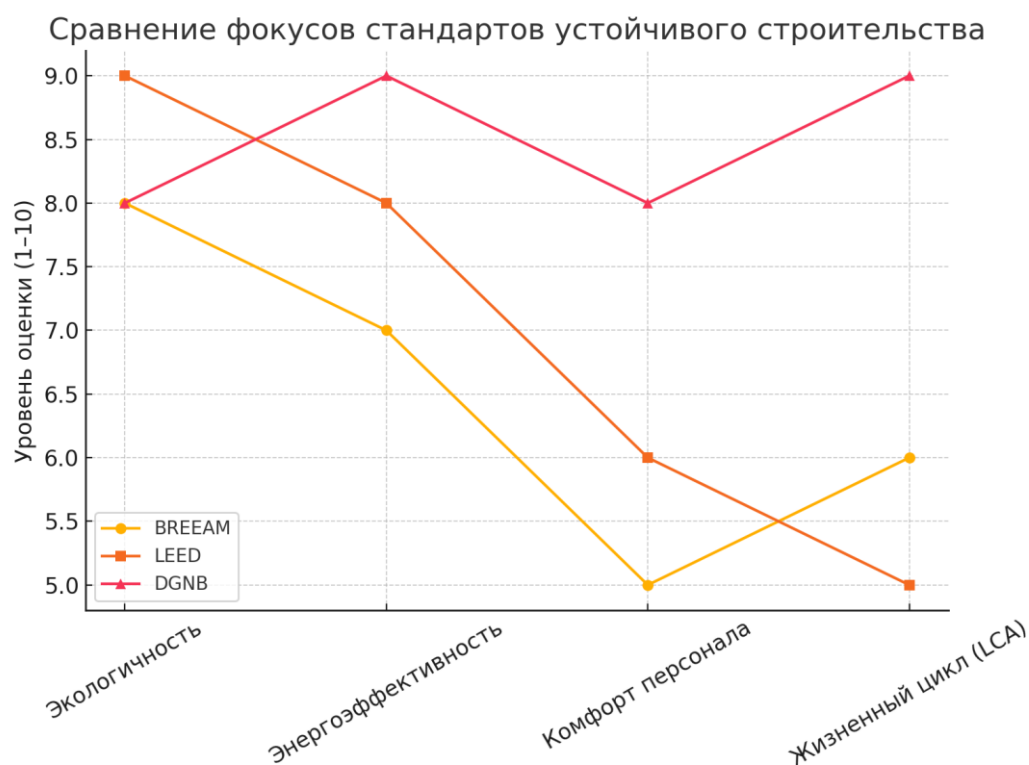


Рисунок 1 – Сравнение направлений фокусировки стандартов устойчивого строительства.

Из приведённого анализа видно, что стандарт DGNB [9] наибольшим образом учитывает аспекты охраны труда и устойчивого функционирования объектов на протяжении всего их жизненного цикла.

Для Республики Казахстан, где вопросы безопасности труда и устойчивого развития становятся всё более актуальными, возможно использование элементов всех трёх систем с акцентом на требования отечественного законодательства и климатические условия.

Заключение

Таким образом, сочетание международного опыта с национальными приоритетами устойчивого развития и охраны труда может стать важным драйвером модернизации логистической отрасли в Республике Казахстан.

Помимо социальных и экологических преимуществ, устойчивое развитие складов обладает высокой экономической целесообразностью.

Внедрение энергоэффективных технологий, автоматизация процессов и улучшение условий труда позволяют существенно сократить эксплуатационные расходы.

Модернизация рабочих мест и использование эргономичного оборудования способствует снижению уровня профессионального травматизма, что в свою очередь уменьшает затраты работодателя на компенсации, медицинское обслуживание и простой оборудования.

Дополнительно, повышение уровня удовлетворенности персонала условиями труда снижает текучесть кадров, сокращая расходы на обучение новых сотрудников и повышая производительность.

По данным исследований, каждое вложение в улучшение условий труда на складе в перспективе 3–5 лет окупается за счет снижения издержек, связанных с безопасностью и потерями эффективности.

Таким образом, устойчивое развитие складов следует рассматривать не как затратную обязанность, а как инвестицию в стабильность и прибыльность предприятия.

Цифровизация логистических процессов — ключевой тренд, способствующий устойчивому развитию складской инфраструктуры. Интеграция цифровых решений, таких как системы управления складом (WMS), технологии интернета вещей (IoT), машинное обучение и аналитика больших данных, позволяет повысить прозрачность, безопасность и устойчивость операций.

Кроме того, цифровизация способствует внедрению бесконтактных решений, что стало особенно актуальным в постпандемийный период с точки зрения безопасности сотрудников.

Таким образом, цифровые технологии играют важную роль в формировании устойчивой, безопасной и эффективной складской среды, соответствующей требованиям охраны труда и экологических стандартов.

Список использованной литературы и нормативных источников

1. Трудовой кодекс Республики Казахстан от 23 ноября 2015 года № 414-V ЗРК.
2. СанПиН № ҚР ДСМ-100/2020 «Санитарные правила и нормы по условиям труда работников».
3. Государственная программа «Зеленая экономика Республики Казахстан», Указ Президента РК от 30 мая 2013 года № 577.
4. Постановление Правительства РК от 31 декабря 2020 года № 966 «Об утверждении Плана мероприятий по обеспечению безопасности и охраны труда»
5. ISO 45001 :2018 Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use.
6. ISO 14001:2015 Environmental management systems — Requirements with guidance for use.
7. LEED v4.1 Rating System, U.S. Green Building Council.
8. BREEAM New Construction Manual, Building Research Establishment, UK.
9. Назарова Г.Е. Управление охраной труда на предприятии: Учебное пособие. — Алматы: КазННТУ, 2021.
10. Жанибекова А.К., Кожамбетов Е.Б. Оценка условий труда на промышленных объектах. — Астана: ЕНУ, 2020.

МҰНАЙ ӨНДЕУ ЗАУЫТТАРЫНДАҒЫ ТЕХНОГЕНДІК ҚАУІПТІЛІКТЕРДІ БАСҚАРУДАҒЫ ЗАМАНАУИ ТӘСІЛДЕР

Исатаева А.К., Қалманбай Н.Қ., Абдибаттаева М.М.

әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
issatayeva.aidana@mail.ru, 13.12.1999nur99@gmail.com, maral7676@mail.ru

1 Кіріспе

Мұнай өңдеу өнеркәсібі Қазақстан Республикасының энергетикалық қауіпсіздігін қамтамасыз етуде және экономикалық тұрақтылығын нығайтуда маңызды рөл атқарады. Атырау, Шымкент және Павлодар мұнай өңдеу зауыттары елдің мұнай-химия саласының негізгі тіректері болып табылады. Алайда бұл өндіріс орындары жоғары қысым, температура және жанғыш заттармен байланысты күрделі технологиялық процестерге негізделгендіктен, оларды техногендік қауіптілігі жоғары нысандар қатарына жатқызуға болады. Соңғы онжылдықтарда техногендік апаттардың салдары бүкіл әлемде өндірістік шығындардан бөлек, адам өміріне, қоршаған ортаға және қоғамның әлеуметтік тұрақтылығына үлкен қауіп төндіретіні дәлелденді. Осыған байланысты мұнай өңдеу зауыттарында тәуекелдерді бағалау мен басқарудың заманауи тәсілдерін енгізу – өзекті ғылыми әрі практикалық міндет болып табылады.

2 Техногендік қауіптіліктердің сипаты

Мұнай өңдеу зауыттарындағы негізгі қауіптіліктерді үш топқа бөлуге болады:

- Физикалық қауіптіліктер – қысымның артуы, температураның көтерілуі, жабдықтың тозуы немесе кенеттен істен шығуы;
- Химиялық қауіптіліктер – улы және жанғыш заттардың шығуы, өрт пен жарылыс қаупі, күкіртті сутек пен көмірсутекті газдардың атмосфераға таралуы;
- Әлеуметтік-экологиялық қауіптіліктер – апат салдарынан халық денсаулығына және экожүйеге ұзақ мерзімді әсерлер, сондай-ақ өндірістік аймақтардың әлеуметтік тұрақтылығына теріс ықпал. [1,2]

Бұл қауіптіліктердің күрделілігі олардың өзара байланысында. Мысалы, жабдықтың істен шығуы (физикалық қауіп) газдың атмосфераға шығуына (химиялық қауіп) алып келуі мүмкін, ол өз кезегінде халыққа экологиялық және әлеуметтік зиян тигізеді.

3 Тәуекелдерді бағалау және басқару әдістері

Қазіргі кезде мұнай өңдеу кәсіпорындарында тәуекелдерді бағалаудың кешенді әдістері қолданылады. Олардың ішінде:

- HAZOP (Hazard and Operability Study) – технологиялық процестердегі ауытқуларды жүйелі талдау;

- FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) – жабдықтың істен шығу ықтималдығы мен салдарын анықтау;
- ETA (Event Tree Analysis) және FTA (Fault Tree Analysis) – ықтимал апат сценарийлерін модельдеу;
- Bow-Tie әдісі – қауіптіліктің себептері мен салдарын жүйелі түрде талдау;
- QRA (Quantitative Risk Assessment) – тәуекел деңгейін сандық тұрғыдан бағалау;
- ISO 31000 және ISO 45001 халықаралық стандарттары – тәуекелдерді басқару мен еңбекті қорғаудың институционалдық негізін қамтамасыз етеді.

Бұл әдістердің интеграциясы өндірістік тәуекелдерді жан-жақты сипаттап қана қоймай, оларды азайтуға және алдын алу шараларын негіздеуге мүмкіндік береді.

4 Заманауи технологияларды қолдану

Соңғы жылдары мұнай өңдеу зауыттарында техногендік тәуекелдерді басқаруда цифрландыру шешуші рөл атқаруда.

Интернет заттар (IoT) сенсорлары өндірістік алаңдағы параметрлерді үздіксіз тіркеуге мүмкіндік береді. Қысымның немесе температураның рұқсат етілген шектен ауытқуы апатқа дейінгі кезеңде анықталып, жедел әрекет етуге жағдай жасайды.

Big Data талдауы жиналған деректерді кешенді өңдеу арқылы қауіпті оқиғалардың жасырын заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік береді. Бұл тәсіл апатқа әкелетін процестерді алдын ала болжауды қамтамасыз етеді. [3,4]

Жасанды интеллект (AI) және нейрондық желілер тәуекелдерді автоматты бағалауға, қауіпті аймақтарды модельдеуге және шешім қабылдау жылдамдығын арттыруға қолданылады. AI негізіндегі басқару жүйелері кейбір жағдайларда апатты болдырмау үшін өндірісті дербес тоқтата алады.

Сандық егіз (Digital Twin) технологиясы нақты қондырғылардың виртуалды көшірмесін жасап, апат сценарийлерін алдын ала талдауға мүмкіндік береді. Бұл әдіс инвестициялық шешімдер қабылдауда және қауіпсіздік шараларын жетілдіруде тиімді құрал болып отыр.

Қазақстандағы Атырау мұнай өңдеу зауытында өндірістік қауіпсіздікті арттыру мақсатында газ шығарындыларын онлайн бақылау жүйесі енгізілсе, Шымкент МӨЗ-де автоматтандырылған қауіпсіздік клапандары орнатылған. Бұл тәжірибелер жаңа технологиялардың тиімділігін дәлелдейді.

5 Нәтижелер мен талқылау

Жүргізілген зерттеу нәтижелері мұнай өңдеу зауыттарында тәуекелдерді басқару жүйесін жетілдірудің артықшылықтарын анық көрсетті. Қазақстандағы ірі өндіріс орындарының ішінде Атырау және Шымкент МӨЗ ерекше назар аударуды қажет етеді. [5,6,7]

Атырау мұнай өңдеу зауыты (АМӨЗ) – елдегі ең көне зауыттардың бірі. Оның өндірістік қуаты жоғары болғанымен, технологиялық жабдықтарының

едәуір бөлігі моральдық тұрғыда тозған. Бұл фактор техногендік қауіптіліктердің, әсіресе газдану және күкіртті сутектің шығуы сияқты химиялық қауіптіліктердің жиі туындауына әсер етеді. Соңғы жылдары АМӨЗ-де газ шығарындыларын онлайн бақылау жүйесі енгізілгенімен, тәуекелдерді басқару көбінесе дәстүрлі әдістерге негізделген.

Шымкент мұнай өңдеу зауыты (ШМӨЗ) 2018 жылғы жаңғырту жұмыстарынан кейін жаңа буын технологияларымен жабдықталды. Мұнда автоматтандырылған қауіпсіздік клапандары, IoT сенсорлары, цифрлық басқару жүйелері және сандық егіз (Digital Twin) элементтері енгізілген. Соның арқасында өндірістік жарақаттар деңгейі төмендеді, ал экологиялық тәуекелдер айтарлықтай қысқарды. Дегенмен, жаңа технологиялардың енгізілуі киберқауіпсіздік тәуекелдерінің күшеюіне алып келді.

6 Қорытынды

Мұнай өңдеу зауыттарындағы техногендік қауіптіліктерді басқару Қазақстан үшін стратегиялық маңызы бар міндет болып табылады. Заманауи цифрлық технологияларды, тәуекелдерді бағалаудың халықаралық әдістерін және басқару стандарттарын кешенді қолдану өндірістік қауіпсіздік жүйесін жаңа деңгейге көтеруге мүмкіндік береді. Бұл тек апаттардың алдын алуға ғана емес, сондай-ақ экологиялық тұрақтылықты қамтамасыз етуге және елдің энергетикалық қауіпсіздігін нығайтуға ықпал етеді.

Әдебиеттер тізімі

1. ГОСТ Р ИСО 31000-2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – М.: Стандартиформ, 2019. – 28 с.
2. ГОСТ Р ИСО 45001-2020. Системы менеджмента охраны труда и техники безопасности. – М.: Стандартиформ, 2020. – 46 с.
3. Elion Technologies. HAZOP Analysis for Refinery Plant in Barauni, India. – 2022.
4. Comparative Study of HAZOP and ETBA Methods on Oil Refinery Unit // Journal of Health, Environment and Health Promotion. – 2023.
5. Implementation of ISO 31000 in Oil Refinery Risk Management // Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. – 2022.
6. Репях Л.П. Формирование готовности персонала нефтегазового комплекса к управлению производственными рисками. – М., 2018.
7. Kapustin V.M., Gureev A.A. Oil Refining Technology. – Moscow: Chemistry, 2020.

ӨНДІРІСТІК ОБЪЕКТІЛЕРДІ ЕҢБЕК ЖАҒДАЙЛАРЫ БОЙЫНША АТТЕСТАТТАУДАН КӘСІПТІК ТӘУЕКЕЛДЕРДІ БАСҚАРУҒА ДЕЙІНГІ ТЕТІКТЕРДІ ЖАҢҒЫРТУ – ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ЕҢБЕКТІ ҚОРҒАУДЫҢ ТӘУЕКЕЛГЕ НЕГІЗДЕЛГЕН МОДЕЛІНЕ КӨШУДІҢ НЕГІЗІ

Қалманбай Н.Қ.^{*}, Исатаева А.К.

әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

^{*}e-mail: 13.12.1999nur99@gmail.com

1 Кіріспе

Өндірістік нысандарды еңбек жағдайлары бойынша аттестаттау жүйесінен кәсіптік тәуекелдерді басқару (КТБасқ) моделіне көшу – еңбекті қорғау мен өнеркәсіптік қауіпсіздік саласында қалыптасқан әдіснамалық тәсілдердің эволюциясын бейнелейтін әлемдік үрдістердің бірі. Қазақстан жағдайында бұл өзгеріс халықаралық стандарттармен (ISO 45001, ХЕҰ ұсынымдары) заңнамалық сәйкестікті қамтамасыз ету, сондай-ақ өндірістік жарақаттануды азайту және алдын алу тиімділігін күшейту қажеттілігіне тікелей байланысты [1, 2].

Осы тұрғыдан алғанда, еңбекті қорғау жүйесінің жаңғыруы формалды рәсімдерді жетілдірумен ғана шектелмей, кәсіпорындар деңгейінде тәуекелге негізделген ойлау мәдениетін қалыптастыруды, қауіпсіздік менеджментін жүйелі әрі дәлелді негізде іске асыруды көздейді.

Зерттеу жұмысы Қазақстандағы еңбекті қорғау жүйесінің даму кезеңдерін, еңбек жағдайлары бойынша аттестаттаудың әлсіз тұстарын және кәсіптік тәуекелдерді басқару қағидаттарына сүйенген жаңа тәсілдің артықшылықтарын талдауға бағытталған. Сонымен қатар, бұл трансформацияның өндірістік ортадағы еңбек қауіпсіздігі деңгейіне ықпалы қарастырылады.

2 Материалдар мен әдістер

Зерттеу барысында Қазақстандағы еңбекті қорғау жүйесінің трансформациясын ғылыми негізде қарастыру үшін теориялық талдау, нормативтік-құқықтық сараптама және салыстырмалы-аналитикалық әдістердің жиынтығы қолданылды. Негізгі назар ұлттық заңнама мен халықаралық тәжірибенің өзара байланысын зерттеуге, сонымен бірге кәсіптік тәуекелдерді басқару жүйесін енгізудің алғышарттары мен ерекшеліктерін анықтауға аударылды.

Дәстүрлі кеңестік аттестаттау жүйесін бағалау үшін тарихи деректер мен нормативтік құжаттар (МЕМСТ, СанҚиН, ҚР Еңбек кодексі) пайдаланылды [3, 4]. Бұдан бөлек, ҚР Денсаулық сақтау және әлеуметтік даму министрлігінің №1057 (2015 ж.) және ҚР Еңбек және халықты әлеуметтік қорғау министрлігінің №363 (2020 ж.) бұйрықтарының мазмұны мен құрылымына салыстырмалы талдау жүргізілді [5, 6].

Кәсіптік тәуекелдерді талдау үшін халықаралық деңгейде кеңінен қолданылатын әдістерге шолу жасалды, соның ішінде:

- Bowtie-талдау: ықтимал себеп-салдар тізбектерін және алдын алу/салдарды азайту шараларын визуалды түрде бейнелеу;
- HAZOP (Hazard and Operability Analysis): технологиялық процестердегі ықтимал ауытқулар мен қауіпті сценарийлерді анықтау;
- FMEA (Failure Modes and Effects Analysis): жабдық пен процестердегі ықтимал ақаулардың салдарын бағалау.

Аталған құралдардың Қазақстандағы еңбек қауіпсіздігін басқару тәжірибесіне бейімделу мүмкіндіктері мен қолдану әлеуеті сарапталды.

3 Нәтижелер мен талқылаулар

Зерттеу нәтижесінде Қазақстанда еңбек қауіпсіздігін қамтамасыз етуде қолданылып келе жатқан екі түрлі тәсілдің – еңбек жағдайлары бойынша өндірістік нысандарды аттестаттау мен кәсіптік тәуекелдерді басқару (КТБасқ) жүйесінің – әдістемелік, ұйымдастырушылық және функционалдық айырмашылықтары айқындалды. Бұл салыстыру жүргізіліп отырған реформалардың мәнін және оларды тәжірибеге енгізу кезінде туындайтын қиындықтарды тереңірек түсінуге мүмкіндік берді.

Аттестаттау жүйесі кеңестік дәстүрден бастау алады және негізінен жұмыс орындарындағы еңбек жағдайларын санитарлық-гигиеналық нормативтерге сәйкестендіру мақсатында физикалық пен химиялық факторларды өлшеуге сүйенеді. Мұндай тәсілдің басты ерекшелігі — реактивтілігі, яғни қауіп пайда болғаннан кейін ғана әрекет етуге бағытталуы. Кәсіптік тәуекелдерді басқару моделі, керісінше, проактивті сипатқа ие. Ол ықтимал қауіпті жағдайларды алдын ала анықтауға, олардың себеп-салдарлық байланысын талдауға және тәуекел деңгейін жүйелі түрде бағалауға негізделген. Бұл модельдің басты артықшылығы – қауіптерді пайда болмай тұрып басқаруға мүмкіндік беруінде.

Аттестаттау барысында жұмыс берушінің рөлі шектеулі болып қала береді: бағалау тәуелсіз сыртқы ұйымдар арқылы жүргізіледі және еңбек ұжымының қатысуы қарастырылмайды. Бағалаудың кезеңдік сипаты (5 жылда бір рет) өндірістік ортадағы өзгерістерге уақытылы жауап қайтаруға кедергі келтіреді. Ал КТБасқ жүйесінде тәуекел матрицасы, Bowtie-талдау немесе «ақаулар ағашы» секілді құралдарды қолдану арқылы қауіптердің пайда болу орны, ықтимал себептері және даму сценарийлері толық сарапталуы мүмкін. Практикалық деректер КТБасқ жүйесін енгізген кәсіпорындарда жазатайым оқиғалар саны мен ауырлығының азайғанын, жұмысшылардың қауіпсіздікке деген жауапкершілігі артқанын және өндірістік тиімділіктің жоғарылағанын көрсетіп отыр. Мұндай нәтижелердің дұрыстығын Халықаралық еңбек ұйымы (ILO) мен АҚШ Ұлттық еңбек қауіпсіздігі және денсаулық институты (NIOSH) да растайды [7].

Жүргізілген зерттеу қорытындылары қазіргі жағдайда Қазақстан үшін еңбекті қорғау жүйесін трансформациялау қажеттілігін дәлелдейді. Аттестаттау жүйесінің шектеулі мүмкіндіктері өндірістік тәуекелдердің толық спектрін

қамтуға жеткіліксіз болса, тәуекелге негізделген басқару әдісі күрделі өндірістік жағдайларға бейімделген заманауи тәсіл ретінде ерекшеленеді. Ол халықаралық стандарттарға сай келіп қана қоймай, еңбек қауіпсіздігін жаңа сапалық деңгейге көтеруге мүмкіндік береді. Сонымен бірге, КТБасқ жүйесін сәтті енгізу үшін заңнамалық-құқықтық негізді күшейту, жұмыс берушілер мен қызметкерлерді әдістемелік тұрғыдан қолдау және қауіпсіздік мәдениетін қалыптастыру маңызды алғышарттар болып табылады.

1-кесте. Аттестаттау жүйесі мен кәсіптік тәуекелдерді басқару жүйесінің негізгі критерийлер бойынша салыстырмалы талдауы

Критерийлер	Аттестаттау жүйесі	Кәсіптік тәуекелдерді басқару (КТБасқ) жүйесі
<i>Тәсілдің сипаты</i>	Реактивті — орын алған мәселені тексеру және сәйкестендіру.	Проактивті — қауіпті алдын ала анықтау және оны басқару.
<i>Қамту ауқымы</i>	Негізінен физикалық және химиялық көрсеткіштер, санитарлық-гигиеналық талаптар.	Кең ауқымды: құрал-жабдық, еңбек үрдісі, адам факторы, психо-әлеуметтік және ұйымдастырушылық қауптер.
<i>Бағалау жиілігі</i>	Кезеңді (әдетте 5 жылға бір рет).	Үздіксіз немесе жоспарлы аралықтармен (динамикалық жаңарту).
<i>Жауапкершілік</i>	Бағалау көбінесе сыртқы ұйымдар арқылы іске асады; жұмысшылардың қатысуы шектеулі.	Жұмыс беруші, менеджмент және жұмысшылардың белсенді қатысуымен жүйелі жауапкершілік.
<i>Құралдар мен әдістер</i>	Өлшеу құралдары, гигиеналық нормативтер, стандартталған тесттер.	Тәуекел матрицасы, Bowtie, HAZOP, FMEA, сценарийлік модельдеу, мониторинг жүйелері.
<i>Деректерге бағдар</i>	Нақты өлшеулер мен нормативтік шектік мәндер.	Әртүрлі дереккөздер (статистика, оқиғалар, бақылау, адамнан алынған деректер) негізінде бағалау.
<i>Икемділік</i>	Шектеулі — стандартизденген процедуралар мен кезеңдік тексерулер.	Жоғары — кәсіпорын ерекшелігіне бейімделіп, өзгерістерге тез жауап береді.
<i>Шығындар және ресурс</i>	Бір реттік/кең тараған бағалауға салыстырмалы түрде төмен шығын.	Алғашқы инвестиция және тұрақты ресурстық талаптар жоғары болуы мүмкін, бірақ ұзақ мерзімді үнемдеу көрсетілуі мүмкін.
<i>Қауіпсіздік мәдениетіне әсер</i>	Формальді талаптарды орындауға бағытталған; мәдени өзгеріс шектеулі.	Қауіпсіздік мәдениетін қалыптастыруға және қызметкерлердің қатысуын ынталандыруға септігі зор.

<i>Нәтиже (практикалық пайда)</i>	Нормативтерге сәйкестік туралы есеп, кемшіліктерді анықтау.	Апаттар мен жарақаттанудың төмендеуі, профилактикалық шаралардың жүйелілігі, өндірістің тұрақтылығы.
<i>Шектеулер</i>	Ұйымдастырушылық, эргономикалық, психоәлеуметтік тәуекелдерді ескермеуі; «қағаз жүзінде» жүргізілу қаупі.	Қызметкерлерді оқыту, деректерді тұрақты жаңарту және басқару шығындарын талап етеді.
<i>Халықаралық стандарттармен сәйкестік</i>	Шектелген — нормативтік талаптарға бағытталған.	Жоғары деңгейде үйлесімділік (ISO 45001 және т.б.).

1-кестеде берілген салыстырмалы талдау нәтижелері әр тәсілдің артықшылықтары мен шектеулерін айқын көрсетті.

Аттестаттау жүйесі:

- *Артықшылықтары:* стандартталған тәртібі, жүргізу құнының төмендігі, шағын кәсіпорындар үшін қолжетімділігі.

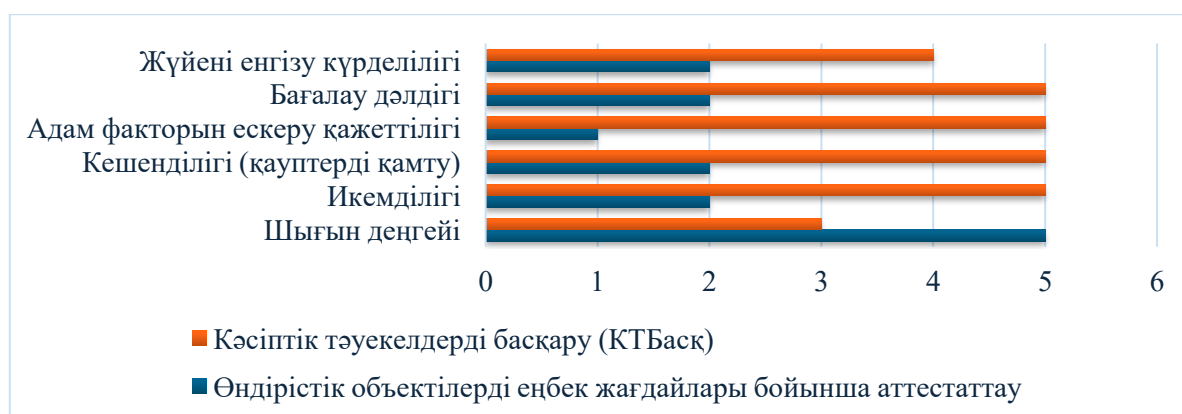
- *Кемшіліктері:* бағалау тек физикалық көрсеткіштермен шектеледі; ұйымдастырушылық, психологиялық және эргономикалық факторлар ескерілмейді; ықтималдық пен салдар ауырлығын есепке алмайды, сондықтан тәуекелдің толық бейнесін бере алмайды.

Кәсіптік тәуекелдерді басқару (КТБасқ) жүйесі:

- *Артықшылықтары:* кешенді, бейімделгіш тәсіл; өндірістік ортаның барлық компоненттерін қамтиды, соның ішінде адам факторын; нақты тәуекел картасын жасауға мүмкіндік береді; халықаралық стандарттармен үйлесімді.

- *Кемшіліктері:* енгізу үшін персоналды қосымша оқыту қажет; деректерді жүйелі жаңарту және құжаттық сүйемелдеу көп ресурсты талап етеді.

Осы айырмашылықтар 1-суретте шартты түрде бейнеленген.



Сурет 1. Аттестаттау мен КТБасқ жүйелерін артықшылықтары мен кемшіліктері бойынша салыстырмалы талдау

Зерттеу барысында КТБасқ жүйесін енгізуге байланысты нақты проблемалар мен мүмкіндіктер айқындалды (2-сурет). Негізгі проблемалар

ретінде заңнамалық талаптардың толық жетілмегендігі, жұмыс берушілердің қосымша шығындарға дайын еместігі, кадрлардың әдістемелік және практикалық дайындық деңгейінің жеткіліксіздігі, сондай-ақ кәсіпорындардағы қауіпсіздік мәдениетінің әлсіздігі атап өтілді. Сонымен қатар, мүмкіндіктер қатарында халықаралық стандарттармен үйлесімділікті арттыру, өндірістегі оқыс оқиғалар мен жарақаттану деңгейін азайту, еңбек өнімділігін көтеру, қызметкерлердің қауіпсіздікке қатыстылығын күшейту және кәсіпорындардың бәсекеге қабілеттілігін арттыру әлеуеті белгіленді.



Сурет 2. КТБасқ жүйесін енгізуге байланысты проблемалар мен мүмкіндіктер

2022 жылғы мәліметтерге сәйкес, өндірістік объектілерді аттестаттаудан өткізу құны шамамен 15 000 теңгені құрайды. Дегенмен, бұл рәсім көп жағдайда нақты еңбек жағдайларын жақсартуға ықпал етпей, тек формальді сипатта қалып қоятыны байқалады.

Ал кәсіптік тәуекелдерді басқару жүйесіне қатысты, Еуропалық еңбек қауіпсіздігі және денсаулық агенттігі (EU-OSHA) жариялаған деректер бойынша, тәуекелдерді тиімді басқаруға жұмсалған әрбір 1 АҚШ доллары орта есеппен 4,3 доллар экономикалық қайтарым әкелетіні дәлелденген [8].

2-кесте. Кәсіптік тәуекелдерді басқару (КТБасқ) мен өндірістік объектілерді еңбек жағдайлары бойынша аттестаттау жүйесінің бағалау критерілеріне салыстырмалы сипаттама

Бағалау критерілері	КТБасқ	Аттестаттау
1. Еңбек жағдайларының зияндылығын (зиянды өндірістік факторлар) бағалау	Өндірістік (технологиялық) факторлардың зияндылығы (химиялық, физикалық, биологиялық, психофизиологиялық) бағаланады.	Еңбек гигиенасы: зиянды және қауіпті факторлардың деңгейі (шу, жарық, ауа сапасы және т.б.).
2. Еңбек жағдайларының жарақат алу қаупін	Өндірістік қауіпті факторлардың (жарылыс, электр соққысы, құлау және	Еңбек процесінің жарақат қауіпсіздігі: жарақат алу тәуекелі

<i>бағалау (қауіпті өндірістік факторлар)</i>	т.б.) әсерінің ықтималдығы анықталады.	(жабдық, жұымс орны жағдайы және т.б.).
<i>3. Өндірістік жабдықтың қауіпсіздігін бағалау</i>	Өндірістік жабдықтың техникалық жай-күйі мен қауіпсіздік жүйелері (қорғау құрылғылары, бұғаттаушылар) тексеріледі.	— (аттестаттау шеңберіне кірмейді)
<i>4. Жеке қорғаныс құралдарымен (ЖҚҚ) қамтамасыз етілуді бағалау</i>	ЖҚҚ-мен қамтамасыз етілу дәрежесі, жарамдылығы, сәйкестігі және қолданылуы бағаланады	Жеке және ұжымдық қорғаныс құралдарының жеткіліктілігі мен дұрыс жұмыс істеуі.
<i>5. Сырқаттанушылықты бағалау</i>	Қызметкерлер арасында еңбек денсаулығына байланысты аурулар статистикасы мен динамикасы талданады.	— (аттестаттау шеңберіне кірмейді)
<i>6. Еңбек процесінің ауырлығы мен қауырттылығын бағалау</i>	— (КТБасқ шеңберіне кірмейді)	Еңбек күші мен күш қажытушылық: ауырлық (ауыр жүк көтеру, күйзеліс) және жұмыс қарқындылығы.

2-кестеге түсіндірме:

- КТБасқ жүйесі – кешенді және алдын алу бағытын ұстанатын тәсіл. Ол тек санитарлық-гигиеналық жағдайлар мен жарақат алу қауіпін ғана емес, сонымен бірге өндірістік жабдықтың қауіпсіздігін, жеке қорғаныс құралдарының тиімділігін және сырқаттанушылық көрсеткіштерін қамтиды.

- Аттестаттау жүйесі дәстүрлі үлгіге негізделген: негізгі назар гигиеналық параметрлерге, жарақаттану қауіпсіздігіне, еңбек процесінің ауырлығы мен қарқындылығына, сондай-ақ қорғаныс құралдарының болуына аударылады. Алайда, мұнда жабдық қауіпсіздігі мен жалпы сырқаттанушылық деңгейі ескерілмейді.

Бұл салыстырмалы талдау еңбек қауіпсіздігін басқаруда қолданылып жүрген екі жүйенің қамту ауқымын айқындап көрсетеді. Сонымен бірге, КТБасқ-қа біртіндеп көшу кезінде қандай жаңа өлшемшарттарды енгізу қажеттігін айқындауға негіз болады.

4 Қорытынды

Зерттеу нәтижелері кәсіптік тәуекелдерді басқару жүйесінің (КТБасқ) еңбек қауіпсіздігін арттыруда және халықаралық стандарттарға (ISO 45001 және т.б.)

сәйкестікті қамтамасыз етуде тиімді құрал екенін көрсетті. Бұл жүйе тек қана өндірістік ортаның физикалық параметрлерін емес, сонымен қатар адами факторларды, ұйымдастырушылық олқылықтарды және психоәлеуметтік қауіптерді қамти отырып, ықтимал қатерлерді кешенді бағалауға мүмкіндік береді. Сонымен бірге, дәстүрлі аттестаттау жүйесінің де бірқатар оң қырлары бар: оның бірыңғай әдістемесі мен салыстырмалы қолжетімділігі шағын және орта кәсіпорындар үшін маңызды болып қала береді. Қазіргі таңда Қазақстандағы көптеген өндірістер аттестаттау моделіне бейімделген, сондықтан КТБасқ жүйесіне толық әрі жедел көшу белгілі бір қиындықтар туғызуы мүмкін.

Осыған байланысты еліміз үшін ең қолайлы бағыт – екі тәсілді ұштастыра отырып, тәуекелге негізделген басқару жүйесіне кезең-кезеңімен өту. Мұндай аралық модель өндірістік ортаның негізгі көрсеткіштерін бақылауды сақтай отырып, қауіптердің алдын алу бойынша заманауи әдістерді біртіндеп енгізуге жол ашады. КТБасқ-ты тиімді жүзеге асыру үшін заңнамалық және әдістемелік базаны жетілдіру, мамандарды даярлау және қайта оқытуға мемлекеттік қолдау көрсету қажет. Бұдан бөлек, өндірістік ортада қауіпсіздік мәдениетін орнықтыру, цифрландыруды жеделдету және қызметкерлердің белсенді қатысуын ынталандыру – еңбек қауіпсіздігін жаңа сапалық деңгейге көтерудің негізгі алғышарттары болып табылады.

Әдебиеттер тізімі

1. International Organization for Standardization (ISO). ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use. Geneva: ISO, 2018.
2. International Labour Organization (ILO). Convention No. 155 on Occupational Safety and Health. Geneva: ILO, 1981.
3. Қазақстан Республикасының Еңбек кодексі: ҚР Заңы 2015 жылғы 23 қарашадағы № 414-V ҚРЗ. Астана, 2015.
4. ГОСТ 12.0.230–2007. ЕҚСЖ. Еңбекті қорғауды басқару жүйелері. Жалпы талаптар. Мәскеу: Стандартиформ, 2007.
5. ҚР Денсаулық сақтау және әлеуметтік даму министрінің 2015 жылғы 28 желтоқсандағы №1057 бұйрығы. Өндірістік объектілерді еңбек жағдайлары бойынша міндетті мерзімдік аттестаттау қағидаларын бекіту туралы. Астана, 2015.
6. ҚР Еңбек және халықты әлеуметтік қорғау министрінің 2020 жылғы 11 қыркүйектегі №363 бұйрығы. Кәсіптік тәуекелдерді басқару қағидаларын бекіту туралы. Нұр-Сұлтан, 2020.
7. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Total Worker Health®. Accessed 14.08.2025. Available at: <https://www.cdc.gov/niosh/twh>
8. European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA). The return on prevention: Calculating the costs and benefits of investments in occupational safety and health in companies. Bilbao: EU-OSHA, 2011.

«ЖЕР СІЛКІНІСІ ТУРАЛЫ ЕРТЕ ЕСКЕРТУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕГІ АҚПАРАТТЫҚ-КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР: ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ТӘЖІРИБЕ ЖӘНЕ ҚАЗАҚСТАН ҮШІН ПЕРСПЕКТИВАЛАР»

Маратова К.А., Бегимбетова А.С.*

Ғ.Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,

Алматы қ., Қазақстан

e-mail: ka.maratova@aes.kz

*e-mail: a.begimbetova@aes.kz

Андатпа: Жер сілкінісі жөніндегі ерте ескерту жүйелерінде (EEW) қолданылатын ақпараттық-коммуникациялық технологиялардың халықаралық тәжірибесі талданады. Жапония, АҚШ, Мексика, Чили және Түркиядағы жүйелердің инфрақұрылымдық ерекшеліктері салыстырылып, олардың артықшылықтары мен шектеулері айқындалды. Қазақстан жағдайында, әсіресе сейсмикалық қауіпті өңірлерде, мұндай жүйелерді енгізудің өзектілігі негізделіп, оларды бейімдеудің негізгі бағыттары ұсынылды.

Кілт сөздер: жер сілкінісі, ерте ескерту жүйесі, EEW, халықаралық тәжірибе, Қазақстан

Кіріспе

Жер сілкіністері – адамзат өміріне және қазіргі инфрақұрылымның тұрақты жұмысына айтарлықтай әсер ететін ең жойқын табиғи құбылыстардың бірі. Оның зардаптары тек қана елді мекендерге ғана емес, сонымен қатар энергетика, көлік және өнеркәсіптік нысандарға да тікелей ықпал етеді. Қауіп-қатерді төмендетудің ең тиімді құралдарының бірі – жер сілкінісі туралы ерте ескерту жүйелері (Earthquake Early Warning, EEW). Мұндай технологиялар бірнеше секундтан ондаған секундқа дейін уақыт ұтып, жедел шараларды жүзеге асыруға мүмкіндік береді: жоғары жылдамдықты пойыздарды тоқтату, газ беруді автоматты түрде ажырату, өндірістік қауіпсіздік хаттамаларын іске қосу және халықты түрлі байланыс арналары арқылы хабардар ету [1]. Қазақстан үшін, әсіресе Алматы қаласы мен оңтүстік-шығыс аймақтарындағы жоғары сейсмикалық белсенділік жағдайында, EEW жүйесін енгізу ерекше өзектілікке ие және халықаралық тәжірибені ұлттық жағдайға бейімдеуді талап етеді.

Ғылыми нәтижелер

Жапония жер сілкінісі жөніндегі ерте ескерту жүйесін (Earthquake Early Warning, EEW) енгізуде алдыңғы қатарлы мемлекет болып табылады. Жапония метеорологиялық агенттігі (JMA) әзірлеген жүйе 2007 жылдан бері тұрақты жұмыс істейді. Жүйенің негізін мыңнан астам сейсмикалық станция мен GNSS

датчиктерінен тұратын жоғары тығыздықтағы бақылау желісі құрайды [2]. Бұл инфрақұрылым жер қыртысындағы дүмпулерді жедел тіркеуге және оларды нақты уақыт режимінде өңдеп, ескерту сигналдарына айналдыруға мүмкіндік береді.

Ескерту хабарламалары теледидар, радио және мобильді қосымшалар арқылы таратылады. Сонымен қатар, жүйе көлік инфрақұрылымымен интеграцияланған. Атап айтқанда, ескерту сигналы түскен жағдайда жоғары жылдамдықты Shinkansen пойыздары автоматты түрде тоқтатылады. Мұндай тәжірибе жаппай апаттардың алдын алуда және халық қауіпсіздігін қамтамасыз етуде ерекше маңызға ие.

АҚШ-та жер сілкінісі жөніндегі ерте ескерту жүйесі *ShakeAlert* деп аталады. Ол АҚШ Геологиялық қызметінің (USGS) үйлестіруімен және Калифорния университеттерімен бірлесіп жүзеге асырылуда. Жүйенің сенсорлық инфрақұрылымы Калифорния, Орегон және Вашингтон штаттарының аумағын қамтиды [3].

ShakeAlert жүйесінің ерекшелігі – ескерту сигналдарын тек халыққа жеткізумен шектелмей, сонымен қатар әртүрлі инфрақұрылымдық және өнеркәсіптік нысандармен интеграциялануында. Хабарламалар мобильді қосымшалар, байланыс операторлары және арнайы өнеркәсіптік API платформалары арқылы таратылады. Бұл шешім қауіпті аймақтардағы тұрғындардың уақытылы әрекет етуін қамтамасыз етіп қана қоймай, сонымен бірге көлік жүйелерінің, энергетикалық кешендердің және басқа да стратегиялық инфрақұрылымның апаттық тұрақтылығын арттыруға бағытталған.

Мексикада жер сілкінісі жөніндегі ерте ескерту жүйесі *SASMEX* 1985 жылғы Мехикодағы жойқын жер сілкінісінен кейін енгізілді. Жүйенің инфрақұрылымы аймақтық деңгейдегі сейсмикалық датчиктер желісіне негізделген [4]. Алынған деректер өңделіп, ескерту сигналдары халыққа көше сиреналары, радиоарналар және SMS хабарламалары арқылы таратылады. Мұндай модель жаппай ақпараттандырудың тиімді құралдарының бірі болып саналады және қалалық аймақтардағы адам шығынын азайтуға бағытталған.

Чилиде жер сілкіністері мен цунамиден қорғау мақсатында Ұлттық төтенше жағдайларды басқару қызметі (*ONEMI*) Әскери-теңіз күштерінің гидрография және океанография қызметімен (*SHOA*) бірлесе отырып, ұлттық деңгейде ерте ескерту жүйесін жүзеге асырады [5]. Бұл жүйе азаматтық қорғау құрылымдарымен және бұқаралық ақпарат құралдарымен интеграцияланған. Мұндай тәсіл төтенше жағдайлар кезінде халыққа ақпаратты жедел жеткізуге және құтқару іс-шараларын үйлестіруге мүмкіндік береді.

1999 жылғы жойқын жер сілкінісінен кейін Түркияда *Istanbul Earthquake Early Warning and Rapid Response System (IERREWS)* жүйесі іске қосылды. Бұл жүйе жүзден астам сейсмикалық датчиктерді қамтиды және газбен жабдықтау желілері мен басқа да инженерлік коммуникацияларды автоматты түрде ажыратуға мүмкіндік береді [6]. Жүйенің негізгі мақсаты – ірі мегаполистегі

халық пен инфрақұрылымды қорғау, сондай-ақ апаттық жағдайлардың салдарын барынша азайту.

Ұлттық деңгейде іске асырылған жер сілкінісі жөніндегі ерте ескерту жүйелері бірқатар ортақ сипаттарға ие болғанымен, олардың инфрақұрылымдық шешімдері мен ұйымдастырушылық ерекшеліктері айтарлықтай өзгеше. Әр елде сенсорлық желінің құрылымы, хабар тарату арналары, сондай-ақ жүйенің артықшылықтары мен шектеулері әртүрлі факторларға байланысты қалыптасқан. Осыған сәйкес, төменде келтірілген кестеде Жапония, АҚШ, Мексика, Чили және Түркиядағы EEW жүйелерінің негізгі параметрлері салыстырмалы түрде берілген.

1-кесте – Әртүрлі елдердегі EEW жүйелерінің салыстырмалы сипаттамалары

Ел	Ескерту арналары	Күшті жақтары	Шектеулері
Жапония	ТВ, радио, қосымшалар, көлік	Жоғары интеграция	Үлкен ошақтарды бағалау қиындығы
АҚШ	Мобильді хабарламалар, API	Өнеркәсіппен интеграция	Қамту аумағы шектеулі
Мексика	Сиреналар, SMS, радио	Халық үшін тиімділік	Байланысқа тәуелділік
Чили	БАҚ, азаматтық қорғаныс	Цунамимен тәжірибесі	Ұзақ аумақ
Түркия	Автоматты ажыратулар	Мемлекеттік қолдау	Жергілікті қамту
Ел	Ескерту арналары	Күшті жақтары	Шектеулері

Қазақстан жағдайында жер сілкінісі жөніндегі ерте ескерту жүйесін енгізу кешенді тәсілді талап етеді. Мұндай үлгі стратегиялық маңызы бар нысандар аумағында сенсорлық желілерді орналастыруды, автоматтандырылған басқару жүйелерімен интеграцияны, CAP-протоколы арқылы хабар тарату арналарының бірыңғайландырылуын, инновациялық шешімдерді енгізуді және халық арасында жүйелі түрде дайындық іс-шараларын ұйымдастыруды қамтиды.

Ұсынылып отырған бағыттардың өзара үйлесімді іске асырылуы сейсмикалық қауіпті азайтуға және төтенше жағдайларда әрекет ету тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Бұл қағидаттардың құрылымдық бейнесі төменде сурет 1-де берілген.

ҚАЗАҚСТАН ҮШІН ДАМУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ



Сурет 1 – Қазақстанда жер сілкінісін ЕЕЖ енгізудің құрылымдық үлгісі

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу нәтижелері көрсеткендей, жер сілкінісі жөніндегі ерте ескерту жүйелері (EEW) сейсмикалық қауіпті азайтуда және төтенше жағдайларда халықты жедел қорғауда тиімді құрал болып табылады. Өртүрлі елдердің тәжірибесін салыстыру олардың инфрақұрылымдық шешімдері мен ұйымдастырушылық тәсілдерінің ерекшеліктерін айқындауға мүмкіндік берді. Қазақстан жағдайында мұндай жүйені енгізу халықтың қауіпсіздігін арттырумен қатар, стратегиялық маңызы бар инфрақұрылымдардың тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін де қажет. Сенсорлық желілерді кеңейту, автоматтандырылған басқару жүйелерімен интеграция және хабар тарату арналарының үйлесімділігі Қазақстандағы сейсмикалық қауіпсіздікті күшейтудің негізгі бағыттары болып табылады.

Әдебиеттер тізімі

1. Allen R.M., Gasparini P., Kamigaichi O., Bose M. The status of earthquake early warning around the world. Seismol. Res. Lett. – 2009. – Vol. 80. – p. 682–693.
2. Japan Meteorological Agency. Earthquake Early Warning.
3. USGS. ShakeAlert® Earthquake Early Warning System.
4. SASMEX. Sistema de Alerta Sísmica Mexicano.
5. ONEMI. Sistema Nacional de Alerta de Sismos y Tsunami.
6. Erdik M., Fahjan Y. Istanbul Earthquake Early Warning and Rapid Response System. Bull. Earthquake Eng. – 2008. – Vol. 6. – p. 1–22.

УДК 338
ББК 65.050
С13

ГЛОБАЛЬНАЯ КЛИМАТИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА И КАЗАХСТАН

Есекина Б.К.¹, Кокорин А.О.², Нурушев Д.А.³

¹Член Совета по зеленой экономике при Президенте РК, Директор Научно-образовательного центра «Green Academy», д.э.н., профессор

²Фонд «Природа и люди», ведущий эксперт по проблеме изменения климата, к.ф.-м.н.

³Магистр Назарбаев Университета

*e-mail: byessekina@green-academy.kz

1. Введение

В г. Бонне с 16 по 26 июня 2025г. прошла ежегодная сессия Вспомогательных органов РКИК ООН, призванная, подготовиться к предстоящей в ноябре этого года Конференции сторон РКИК ООН в г. Белем (Бразилия)-COP-30.

62-ая сессия началась с двух дней дебатов по Повестке дня, в рамках которых стороны предлагались новые пункты Повестки конференции, в частности, предложения развивающихся стран (Группы LMDC) о рассмотрении односторонних торговых барьеров и об отдельном обсуждении действий (рабочей программы) по статье 9.1 Парижского соглашения (ПС) – финансовой поддержки со стороны развитых стран [1]. В итоге было принято компромиссное предложение Группы 77 и Китая, что торговые меры войдут в имеющиеся в повестке пункты, в частности, в рассмотрение справедливого перехода.

Ст. 3.5 РКИК ООН гласит, что «меры, принимаемые в целях борьбы с изменением климата, включая односторонние меры, не должны служить средством произвольной или необоснованной дискриминации, или скрытого ограничения международной торговли».

2. Справедливый переход к зеленой экономике

В РКИК давно обсуждается тема влияния низкоуглеродного развития одних стран и/или секторов мировой экономики на другие сектора и государства. Многие годы эта тема шла в формате дискуссий и Форума по ответным мерам (Response measures, RM) в рамках работы по Конвенции, Киотскому протоколу и ПС. Инициаторами темы были, прежде всего, арабские страны - экспортеры углеводородов, которые настаивали на рассмотрении негативного влияния развитых стран на экономику развивающихся. В свою очередь, развитые государства отмечали предсказуемость снижения спроса и возможности диверсификации экономики, равно как и наличие позитивных эффектов. В Бонне было принято очередное организационное решение о продолжении работы Форума, кроме того, по инициативе развивающихся стран была принята неофициальная записка по RM (Conference Room Paper, CRP), отражающая новый контекст – рассмотрение односторонних торговых барьеров [2, 3]. Наличие записки в статусе CRP не означает ее рассмотрения на COP 30 в Бразилии, однако ее роль - «подстраховать» включение торговых барьеров в основном выбранном для этого документе - Рабочей программе по обеспечению справедливого перехода (Just Transition Work Program, JTWP).

Решение о JTWP было принято еще на COP 28 в г.Дубае, в целях достижения справедливого для всех стран и групп населения глобального перехода на «новую жизнь», включая действия по достижению устойчивого развития, искоренение нищеты, адаптации к изменениям климата, наращивание потенциала и финансирование развивающихся стран и др.) [4]. Было намечено на COP 31 рассмотреть итоги работы и принять решение о продолжении данной деятельности. К сожалению, в г. Баку не удалось выработать документа по JT, т.к. развивающиеся страны (Группа LMDC) и ряд других государств возражали против признания социально-экономических возможностей ухода от ископаемого топлива и достижение консенсуса были направлены на новую финансовую цель ПС.

В г.Бонн решений не принималось, но шли активные дебаты, усиленные выбором JT для обсуждения односторонних торговых мер. Была подготовлена информационная записка (Informal Note) сопредседателей SBs, статус которой подразумевает продолжение ее рассмотрения для принятия решений на COP 30. В документе три группы опций: первая -касается детализации действий в сфере энергетики, включая 1) отказ от ископаемого топлива; 2) всеобщий доступ к устойчивой энергии и энергобезопасности. При этом в других подпунктах сферы охвата зафиксирована всеобъемлющая деятельность, включая сельское хозяйство, природу и жизнь людей в целом, но чем настаивали многие страны, а также экологическая общественность. Вторая группа опций касается 1) торговых мер, в частности, мер в области международной кооперации и реакции на обеспокоенность нарастанием изменений климата, ограничивающих торговлю; 2) трансграничные воздействия климатических мер, включая их воздействие на торговлю [5].

Третья группа опций определяет дальнейшую деятельность по JT. Первый вариант не подразумевает существенных изменений, будут идти обсуждения и делаться политические заявления. Вторая опция, на КС 30 приблизиться к практике: создание глобальной информационной платформы или сети технического содействия. Самый действенный вариант – решение о создании специального механизма, условно называемого BAM (Belem Action Mechanism on JT) и на таком ускорении деятельности настаивает экологическая общественность. Есть и третья опция - подождать до конца 2026 года и на КС 31 принять решение по продолжению деятельности. У этой опции большие шансы, так как при образовании JTWP именно КС 31 была названа следующей датой принятия решений.

3. Адаптация к изменениям климата

Второй насущной задачей сессией была подготовка документов, связанных с глобальной целью ПС по адаптации (Global Goal on Adaptation, GGA), принятой в ОАЭ на КС 28. Важной частью этой работы, рассчитанной на два года, является разработка индикаторов мер адаптации, которые получают финансовую поддержку (эта деятельность получила название «ОАЭ – Белем рабочая программа по индикаторам»). Первоначально предложения стран и различных заинтересованных лиц содержали около 1500 индикаторов, затем в Бонну был подготовлен консолидированный список из 490 индикаторов, однако ранее было решено для работоспособной системы адаптации нужно, чтобы было не более 100 индикаторов [6]. Будут приниматься не индикаторы в целом, каждый из них должен быть увязан с конкретным пунктом параграфов 9 и 10 GGA. Это означает, что нужны индикаторы для оценки жизни людей и соответствующей инфраструктуры, природы и культурного наследия (в отличие, например, от индикаторов для секторов экономики, работы промышленных предприятий, бизнеса и т.п.).

В Бонне активно обсуждались приоритеты индикаторов. Развивающиеся страны настаивали на главенстве финансовых параметров помощи Севера, при этом Группа LMDC не считала приоритетными социально-экологические аспекты. Предлагались варианты системы главных и вторичных индикаторов, но они не вошли в решение по GGA, описывающее, прежде всего, критерии выбора индикаторов. Все индикаторы должны быть измеряемыми [7]. Индикаторы, отражающие риски и угрозы, должны быть прямо увязаны с адаптацией, включая индикаторы при разных сценариях развития глобального потепления. Индикаторы, заимствованные из других конвенций, прежде всего, по биоразнообразию и опустыниванию должны быть ориентированы на адаптацию. При этом национальные особенности могут быть отражены в суб-индикаторах. После длительных дебатов был согласован пункт по средствам реализации (Means of Implementation, MOI).

Наименее развитые (Least Developed Countries, LDC) и ряд других развивающихся стран призывали обсудить финансовую цель GGA, в частности,

в рамках Дорожной карты Баку по адаптации (Baku Adaptation Roadmap, BAR). Развитые страны были против обсуждения принятой в Баку финансовой цели ПС на 2035 год (она не содержит численных параметров для адаптации и отдельно для LDC). Была подготовлена неофициальная записка председателей ВОО и ВОКНТА для рассмотрения на КС 30 с различными опциями продолжения работы BAR, включая создание новой Рабочей программы. Там же представлены варианты трансформации деятельности по адаптации в целом [8].

Еще одним вопросом адаптации является пересмотр руководящих указаний о том, как страны должны докладывать о своих национальных планах адаптации (NAP). Ранее предполагалось, что работа завершится на COP 31. К сессии в Бонне секретариатом был подготовлен доклад о опыте ряда стран по NAP, где предложено завершить пересмотр в 2028 году, следуя за пересмотром ETF (Enhanced Transparency Framework) - правил представления информации в целом [9].

4. Вопросы нерыночных механизмов

Обсуждение нерыночных подходов к сотрудничеству стран (без передачи углеродных единиц) по статье 6.8 ПС (NMA, Non Market Approach) явилось важной частью Повестки переговоров в Бонне. Данные вопросы, включают проблемы введения углеродных налогов, платежей, стандартов и др. Как известно, ранее была создана специальная платформа для совместных действий, в 2024 году появилась заявка от семи стран Африки, а в мае 2025 года представлена Японией по развитию NMA в четырех государствах Азии [10]. Страны не спешат, хотя на платформе уже более 20 организаций выразили готовность участвовать и поддерживать сотрудничество по NMA [11].

В результате была подготовлена неформальная записка, имеющая статус предложений Председателя ВОКНТА, для последующего рассмотрения на КС 30 [12]. В ней позитивно представлен прогресс по ст.6.8, растущий интерес стран (уже почти 100 государств определили своих контактных лиц по NMA) и различных организаций к развитию NMA. Предложены технические усовершенствования платформы. Намечены действия по повышению потенциала стран в развитии NMA, а также проведение на КС 30 рабочего совещания с особым вниманием к действиям по устойчивому управлению лесами, сочетающими адаптацию (смягчение последствий изменений климата) и предотвращение изменений климата (mitigation).

Также в Бонне состоялось рабочее совещание по ст.6.8, в частности, предлагалось, чтобы страна могла участвовать в одиночку, т.к. непросто договориться с соседями. Однако это противоречит самой сути ст.6, посвященной международной кооперации. Другая идея («contribution approach») тоже отражает сложности действий на уровне стран, предлагается «спуститься» на уровень крупных компаний, корпораций, которые намерены достичь углеродной нейтральности. Они могут инвестировать в NMA той или иной страны или группы стран и часть углеродного эффекта зачесть себе без покупки

углеродных единиц. Конечно, при этом возникает немало сложностей, в частности, как избежать двойного учета, как сопрягать эту деятельность с ОНУВ, однако по мнению участников совещания данная идея заслуживает проработки.

По программе по предотвращению изменений климата (Mitigation Work Program, MWP) была подготовлена только краткая неофициальная записка [13]. Фактически прогресса не было, т.к. обсуждалось создание цифровой платформы по обмену опытом (решение о ее создании было принято на КС 29), а также возможные элементы решения на КС 30.

В решении ВОКНТА по исследованиям и систематическим наблюдениям была одобрена деятельность Всемирной метеорологической организации и Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), в частности по подготовке Седьмого оценочного доклада, Специального доклада по городам и Методологического доклада по кратковременным климатическим факторам (метан, сажа и др.) [14]. ВОКНТА просит МГЭИК подготовить Методологический доклад по удалению (removal), а также улавливанию, хранению и использованию CO₂, продолжить представлять странам научную, техническую и социально-экономическую информацию по изменению климата.

Работа сессии как обычно включала различные встречи и семинары, где страны и представители бизнеса, науки, гражданского общества, коренных народов и др. обменивались мнениями по различным аспектам снижения выбросов парниковых газов и адаптации к изменениям климата. Именно на них, рассматривались NDC 3.0 (определяемые на национальном уровне вклады в Парижское соглашение на 2035 год). Подача NDC, вероятно, главное глобальное действие 2025 года и все страны должны это сделать к COP 30. Сейчас на портале NDC РКИК более 25 документов, в том числе ряда ведущих стран [15].

Были проведены консультации по Дорожной карте «Баку – Белем 1.3Т» (достижение к 2035 году уровня климатического финансирования развивающихся стран 1,3 трлн\$/г, из которых 300 млрд будут средства Глобального Севера, а 1 трлн Юга) [16]. Развитые страны продвигали идею массового привлечения частных финансов всех стран. Развивающиеся государства и экологическая общественность выражали сомнения, указывая что более 50 крупнейших частных банков продолжают активно финансировать использование ископаемого топлива. Наименее развитые государства подчеркивали ключевую роль финансирования по линии «потерь и ущерба». Арабские страны указывали на важность инвестиций в улавливание и захоронение CO₂. Бразилия неофициально назвала три приоритета: тропические леса, агроэкология, частные финансы.

5. Итоги сессии и выводы для Казахстана

Страны продемонстрировали медленный, но прогресс в подготовке решений по ПКС, особенно в части обсуждения индикаторов адаптации, Дорожной карты Баку- Белем и нерыночных механизмов по ст.6.8 в части привлечении частных инвестиций.

Республике Казахстан, в преддверии COP-30 необходимо обсудить с бизнес-ассоциациями и общественностью проект NDC-3, назначить ответственного за переговоры по нерыночным методам Ст.6.8 (NMA), включая продвижение углеродных стандартов и сертификацию офсетных проектов. Важной составляющей подготовки к COP является продолжение работы по согласованию Дорожной карты достижения углеродной нейтральности РК до 2060г., разрабатываемой Министерством национальной экономики. Кроме того, в качестве рекомендаций Правительству, можно рекомендовать усиление интеграции с центрально-азиатскими странами, в части повышения потенциала по привлечению климатического финансирования в соответствии с Поручением Президента РК К.Токаева, высказанных в рамках Послания г. Самарканде на Саммите «Центральная Азия-ЕС» в сентябре 2025г.

Безусловно, названная деятельность требует экспертной подготовки и проведения специальных тренингов и семинаров для лиц, принимающих решения. В этой связи, актуальным остается вопрос по созданию образовательного климатического хаба для топ-менеджеров по типу уже действующего хаба в ОАЕ.

Список литературы

1. United Nations Framework Convention on Climate Change. (n.d.). June Climate Meetings (SB 62).

<https://unfccc.int/sb62>

2. United Nations Framework Convention on Climate Change. (2025, June 26). Matters relating to the forum on the impact of the implementation of response measures serving the Convention, the Kyoto Protocol and the Paris Agreement: Draft conclusions proposed by the Chairs (FCCC/SB/2025/L.3; Advance version). UNFCCC.

https://unfccc.int/sites/default/files/resource/sb2025_L03_adv.pdf

3. United Nations Framework Convention on Climate Change. (2025, June 26). Conference room paper on matters relating to the forum on the impact of the implementation of response measures serving the Convention, the Kyoto Protocol and the Paris Agreement: SBI 62 agenda item 9, SBSTA 62 agenda item 9 (Conference Room Paper, Version 26 June 2025, 11:41). UNFCCC.

https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RM_CRP_sb62_2.pdf

4. United Nations Framework Convention on Climate Change. (2024). Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement on its fifth session, held in the United Arab Emirates from 30 November to 13 December 2023: Addendum. Part two: Action taken by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement at its fifth session (FCCC/PA/CMA/2023/16/Add.1). United Nations.

https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2023_16a01R.pdf

5. United Nations Framework Convention on Climate Change. (2025, June 25). United Arab Emirates just transition work programme: Informal note on SBSTA 62 agenda item 8 / SBI 62 agenda item 8 (Version 25 June 2025, 22:00). UNFCCC.
https://unfccc.int/sites/default/files/resource/JTWP_dt_sb62_DD.pdf
6. United Nations Framework Convention on Climate Change. (2025, May 22). Consolidated list of indicator options, UAE-Belém work programme on indicators (Intersessional document). UNFCCC.
<https://unfccc.int/documents/647049>
7. United Nations Framework Convention on Climate Change. (2025, June 26). Matters relating to the global goal on adaptation: Draft conclusions proposed by the Chairs (Advance version, FCCC/SB/2025/L.4). UNFCCC.
https://unfccc.int/sites/default/files/resource/sb2025_L04_adv.pdf
8. United Nations Framework Convention on Climate Change. (2025, June 25). Matters relating to the global goal on adaptation: Informal note by the co-facilitators (SBSTA 62 agenda item 5(a); SBI 62 agenda item 11(a)). UNFCCC.
https://unfccc.int/sites/default/files/resource/GGA_dt_sb62_2.pdf
9. United Nations Framework Convention on Climate Change. Subsidiary Body for Implementation. (2025, April 22). Experience with the application of the guidance on adaptation communications contained in decision 9/CMA.1: Synthesis report by the secretariat (FCCC/SBI/2025/9). UNFCCC.
<https://unfccc.int/documents/645735>
10. United Nations Framework Convention on Climate Change. (n.d.). Non-market approaches [Article 6.8 NMA platform].
<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/cooperative-implementation/Article-6-8/nma-platform/main/non-market-approaches>
11. United Nations Framework Convention on Climate Change. (n.d.). Support available [“Support available” section of the NMA Platform].
<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/cooperative-implementation/Article-6-8/nma-platform/main/support-available>
12. United Nations Framework Convention on Climate Change. Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice. (2025, June 24). Work programme under the framework for non-market approaches referred to in Article 6, paragraph 8, of the Paris Agreement and in decision 4/CMA.3: Draft text (SBSTA 62 agenda item 12). UNFCCC.
https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Art_6.8_SBSTA_12_dt_sb62_0.pdf
13. United Nations Framework Convention on Climate Change. (2025, June 26). Co-facilitators’ informal note on SBSTA 62 agenda item 7 / SBI 62 agenda item 7: Sharm el-Sheikh mitigation ambition and implementation work programme. UNFCCC.
https://unfccc.int/sites/default/files/resource/MWP_dt_sb62_3.pdf
14. United Nations Framework Convention on Climate Change. Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice. (2025, June 26). Research and systematic

observation: Draft conclusions proposed by the Chair (FCCC/SBSTA/2025/L.5). UNFCCC.

<https://unfccc.int/documents/648220>

15. United Nations Framework Convention on Climate Change. (n.d.). Nationally Determined Contributions Registry. UNFCCC.

<https://unfccc.int/NDCREG>

16. United Nations Framework Convention on Climate Change. (n.d.). Presidency-led consultation event with stakeholders on the Baku to Belém Roadmap to 1.3T. UNFCCC.

<https://unfccc.int/event/presidency-led-consultation-event-with-stakeholders-on-the-baku-to-belem-roadmap-to-13-t>

УДК 543.272.73, 661.666.14

СИНТЕЗ ГРАФЕНА НА ПОВЕРХНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТОКОСЪЁМНИКОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Н.Г. Приходько^{1,2*}, Д. К. Абжал¹

¹АУЭС им. Гумарбека Даукеева, Алматы, Казахстан

²Институт проблем горения, Алматы, Казахстан

*e-mail.ru: nik99951@mail.ru

Спрос на устройства хранения энергии возрастает с каждым годом, в связи с интенсивным развитием, как бытовой электронной техники, так и развитием электротранспорта. Суперконденсаторы, обладая высокой скоростью заряда и разряда, достаточно большим сроком эксплуатации, а также высокой удельной мощностью и безопасностью, составляют наряду с литий-ионными аккумуляторами рынок современных электрохимических накопителей энергии [1-4]. Применение водных электролитов в суперконденсаторах позволяет получить высокую удельную мощность до 10 кВт/кг, по сравнению с органическими, водно-солевыми и ионными электролитами. Однако применение водных электролитов в суперконденсаторах приводит к коррозии поверхности металлических токосъёмников. Ещё одной отрицательной стороной при применении электролитов в суперконденсаторах является процесс отслаивания углеродного активного материала от поверхности токосъёмника что снижает срок их эксплуатации и ёмкостные характеристики.

Покрытие поверхности металлического токосъёмника углеродными материалами (например, обычным графитом, углеродными нанотрубками, графеном) позволяет решить ряд вопросов. Например, нанесённый слой графита на поверхность металлического токосъёмника создаёт прочную адгезию и

хороший межфазный контакт активного углеродного материала к поверхности токосъёмника. Также опубликованы результаты по исследованию покрытия поверхности алюминиевого токосъёмника тонким слоем графитовой краски (Acheson Electrodag 965SS). Установлено, что покрытие обеспечивает хороший межфазный контакт, хорошую проводимость, стойкость к коррозии, электрохимическую стабильность по сравнению с алюминиевым токосъёмником без покрытия. Однако стабильность данных покрытий не всегда отвечает поставленным требованиям. Покрытие поверхности токосъёмника графеном в суперконденсаторах имеет преимущество по сравнению с покрытиями другими углеродными структурами (например, обычным графитом), что выражается, при наличии вышеперечисленных свойств, в увеличении удельной ёмкости за счёт двойного электрического слоя [5-7].

К настоящему времени разработаны различные методы синтеза графена. Среди них механическое расслоение, химическое расслоение, химический синтез и синтез методом термического химического осаждения из паровой фазы (CVD) являются наиболее часто используемыми методами на сегодняшний день. Сообщается также о некоторых других методах, таких как распаковка нанотрубок и микроволновой синтез. Среди всех существующих методов термическое химическое осаждение из паровой фазы уникально тем, что создает однородный слой из атомов углерода, катализируемых термически и химически, и его можно наносить на металлические поверхности (и на пористой металлической поверхности), а также переносить на широкий спектр подложек.

Были проведены работы по разработке метода осаждения графена на поверхность образцов металла с использованием процесса химического осаждения из паровой фазы (метод CVD) и в пламени, а также проведены исследования морфологических, структурных свойств и коррозионной стойкости полученных образцов токосъёмника для электродов суперконденсаторов.

В рамках данной работы была собрана система CVD, которая состоит из 3-х зонной горизонтальной трубчатой печи с программируемыми регуляторами температуры, газовой системы с регуляторами расхода газа и тремя газовыми баллонами: метаном (ТОО «Ихсан Техногаз», особой чистоты), водородом (ТОО «Ихсан Техногаз», особой чистоты) и аргоном (ТОО «Ихсан Техногаз», особой чистоты), а также вакуумным насосом.

Выращивание графена методом CVD проводили на фольге из чистого металлического никеля (Alfa Aesar, толщиной 0,025мм, с чистотой 99,99%). Процедура выращивания графена на никелевой подложке проводилась следующим образом: образец металлического никелевого токосъёмника размером 20х20 мм помещается в центр трехзонной кварцевой трубчатой печи. Подложку сначала нагревали от комнатной температуры до 980 °С со скоростью нагрева 8 °С/мин при атмосферном давлении в потоке газообразного аргона и водорода при расходах 350 и 50 см³/мин, соответственно. Подложку выдерживали при этой температуре в газовой смеси Ar:H₂ в течение 15 мин. Рост начинается с подачи метана в камеру под избыточным давлением в одну

атмосферу в течение 10 мин. В процессе выращивания графена расход газообразного аргона и водорода составлял 200 и 40 см³/мин, соответственно. Соотношение CH₄:H₂ составляет 2:1 по объему, что дает общее атомное отношение углерода к водороду 0,2. Затем образец перемещали в холодную зону для быстрого охлаждения в потоке газообразного аргона и водорода.

Получены СЭМ фотографии поверхности никелевой подложки после синтеза графена при 980 °С при разных соотношениях CH₄:H₂. На основе анализа СЭМ фотографий установлено, что при соотношении CH₄:H₂=2:1 (CH₄ – 80 см³/мин; H₂ – 40 см³/мин) доминирует зародышеобразование графена с ограничением роста самих зародышей. Вследствие чего на фотографии наблюдается множество участков с относительно небольшой площадью. При уменьшении потока метана до 40 и 20 см³/мин при соотношении CH₄:H₂ 1:1 и 1:2, соответственно, на фотографии можно наблюдать тенденцию уменьшения плотности с увеличением площади зародышей.

Малослойная структура графена подтверждена с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света (Раман спектроскопия). Слабый пик D (1362 см⁻¹) указывает на то, что сформированная пленка графена имеет зерна с очень небольшим количеством дефектов. Пик G расположен при 1580 см⁻¹, а 2D-пик расположен при 2734 см⁻¹. Наличие остроугольного пика 2D подтверждает присутствие графена и, исходя из соотношения интенсивностей пиков I_G/I_{2D} = 1,2, установлено, что графен имеет толщину всего несколько атомных слоев (примерно 2 слоя).

В целях определения температурного режима роста графена синтез проводили при температурах 900, 940 и 980°С. Анализ полученных результатов на СЭМ и Раман спектроскопии показал, что рост графена происходит при 980°С. Синтез графена практически не происходит при температуре 940°С.

После отработки условий и параметров роста на чистой никелевой фольге графеновые слои были успешно получены на поверхности пористых металлических токосъемников. Далее пористые токосъемники со слоем графена были исследованы методами растровой электронной микроскопии, рентгеновской дифракции, спектроскопии комбинационного рассеяния с целью определения морфологических и структурных свойств. Установлено, что количество слоев графена, полученных на пористой структуре, не превышает 5 слоев. Данные рентгеноструктурного анализа показали наличие дифракционного пика (002), что указывает на разрыв межплоскостных С-связей и образование графена. В то же время широкий (100) пик с низкой интенсивностью указывает на отсутствие структуры графита. При проведении морфологических исследований методом СЭМ, установлено, что при осаждении графена CVD методом пористая структура металлического токосъемника не нарушается.

В качестве альтернативного метода синтеза графена на токосъемнике применяли метод синтеза в пламени при атмосферных условиях. Процесс образования наноструктур в пламени представляет собой быструю реакцию, обычно от 10⁻⁵ до 10⁻³ секунд. Метод синтеза графена в пламени – это

непрерывный, простой и недорогой метод, и он может успешно конкурировать с методом CVD. Синтез графена в пламени проводили в предварительно перемешанном пропан-кислород-аргонном пламени при атмосферном давлении при $T=950-980^{\circ}\text{C}$ при следующих расходах: пропан – $170\text{ см}^3/\text{мин}$, кислород – $370\text{ см}^3/\text{мин}$, аргон – $160\text{ см}^3/\text{мин}$, что соответствовало соотношению $\text{C/O}=0,7$.

Предварительно обработанный в течение 30 минут в 20% растворе азотной кислоты никелевый токосъёмник помещали вертикально в пламя и держали в течение 1-2 минут. Затем проводили быстрое охлаждение в среде аргона, предварительно погасив пламя.

Исследование полученных на токосъёмнике углеродных структур проводили на Раман-спектрометре NTEGRA Spectra при длине волны $\lambda = 473\text{ нм}$. Наличие слоев графена оценивалась по наличию характерных для него трех пиков: первый пик D при 1351 см^{-1} , второй пик G при 1580 см^{-1} и третий пик 2D при 2700 см^{-1} . Соотношение между интенсивностью G пика (I_G) и 2D пика (I_{2D}) дает оценку числа слоев (I_G/I_{2D}). Для моно- и двухслойного графена это соотношение меньше единицы.

Раман-спектроскопия позволила определить наличие слоистых графеновых пленок, а также оценить качество получаемых графеновых слоев. Установлено, что графены формируются на большей части токосъёмника. МАП-карта участка $50\times 50\text{ мкм}$ при тестировании на Раман-спектрометре показала наличие графена практически на всей поверхности. При этом установлено, что количество слоёв графена, образующихся на токосъёмнике при синтезе в пламени, находится преимущественно в диапазоне 5-10 слоёв ($I_G/I_{2D} = 1,5-2,2$). При этом графен имеет большую дефектность по сравнению с графеном, полученным методом CVD, а также наблюдается аморфная сажевая структура. Для удаления аморфной углеродной структуры с токосъёмника был отработан метод ультразвуковой обработки в дистиллированной воде в течение 1-5 минут, который дал положительный результат. Аморфная углеродная структура отслаивается от поверхности токосъёмника и уходит в раствор дистиллированной воды. При этом слои графена, находящиеся на поверхности токосъёмника, очищаются от аморфной структуры.

В результате исследований было установлено, что можно получать графен на токосъёмнике в пламени при атмосферных условиях. Учитывая тот факт, что CVD-метод является энергозатратным, многокомпонентным, продолжительным по времени и для его проведения требуется тщательная подготовка и высокая чистота исходных компонентов, поэтому процесс синтеза графена в пламени является предпочтительным. Однако для того, чтобы процесс синтеза графена в пламени мог составить конкуренцию CVD-методу, требуется соответствующая доработка.

Для определения коррозионной стойкости токосъёмника использовали щелочные (6M KOH) и кислотные ($2\text{M H}_2\text{SO}_4$) водные электролиты. Коррозионная стойкость изучалась косвенно путем измерения сопротивления электродов методом спектроскопии электрохимического импеданса и

циклической емкостной стабильности токосъемника путем циклирования зарядки-разрядки. Установлено, что металлические токосъемники, покрытые графеновым слоем, являются коррозионностойкими, как в щелочной, так и в кислотной среде при 2000 циклировании.

Таким образом, в результате проведенных исследований был разработан метод осаждения малослойных графенов на поверхность образцов металла с использованием процесса химического осаждения из паровой фазы и в пламени. Также получены результаты морфологических, структурных исследований и результаты испытаний на коррозионную стойкость полученных образцов токосъемника. Полученные на металле структуры с малослойным графеном являются токосъемниками для изготовления электродов для суперконденсаторов. Слой графена, образованный на поверхности металлического токосъемника, увеличивает электропроводность, химическую стойкость к электролитам, используемым в суперконденсаторах, и увеличивает удельную емкость конденсатора за счет электрохимической емкости двойного слоя углерода.

Благодарности

Работа поддержана Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках проекта № AP26194933.

Список литературы

1. Stoller M.D., Park S., Zhu Y., An J., Ruoff R.S. Nano Lett. – 2008. – Vol. 8(10). – P. 3498-3502.
2. Wang Y., Shi Z., Huang Y., Ma Y., Wang C., Chen M., Chen Y. J. Phys. Chem. C. – 2009. – Vol. 113. – P. 13103-13107.
3. Liu C., Yu Z., Neff D., Zhamu A., Jang B.Z Nano Lett. – 2010. – Vol. 10. – P. 4863-4868.
4. Liv W., Tang D.M., He Y.B., You C.H., Shi Z.Q., Chen X.C., Chen C.M., Hou P.X., Liu C., Yang Q.H. ACS Nano. – 2009. – Vol. 3. – P. 3730-3736.
5. Geim A.K., Novoselov K.S. Nat.Mater. – 2007. – Vol. 6. – P. 183-191.
6. Geim A.K. Science. – 2009. – Vol. 324. – P. 1530-1534.
7. Park S., Ruoff R. S. Nature Nanotechnology. – 2009. – Vol.4. – P. 217-224.

ЕҢБЕК ҚОРҒАУ БОЙЫНША ОҚЫТУ ЖҮЙЕЛЕРІНЕ МИКРОЛЕРНИНГ ӘДІСІН ЕНГІЗУ

Танабаева З.Р.

Ғ.Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан

* e-mail: Za.khassenova@aes.kz

Кіріспе

Қазіргі заманда еңбек қорғау және өндірістік қауіпсіздік мәселелері кез келген ұйымның тұрақты дамуының негізгі шарттарының бірі болып отыр. Статистикалық деректерге сүйенсек, жазатайым оқиғалардың едәуір бөлігі қызметкерлердің қауіпсіздік нормаларын жеткілікті деңгейде меңгермеуінен туындайды. Дәстүрлі оқыту курстары, семинарлар мен нұсқамалар көбіне ақпаратты біржақты берумен шектеліп, тыңдаушылардың белсенділігін төмендетеді.

Бүгінгі таңда білім беру технологияларының эволюциясы еңбек қорғау саласына да еніп, жаңа әдістерді қолдануды талап етеді. Солардың бірі – микролернинг әдісі. Бұл әдіс қысқа уақыт ішінде шағын көлемдегі білімді тиімді жеткізуге және сол білімді нақты жұмыс жағдайында қолдануға бағытталған. Осы тұрғыда зерттеу тақырыбының өзектілігі айқындалады.

Еңбек қауіпсіздігі – жұмыс берушінің де, жұмысшының да тікелей жауапкершілігінде болатын, өндірістік процеске тікелей әсер ететін фактор. Оқыту – қызметкерлерге қажетті білім мен машықты беретін, олардың қауіпсіз жұмыс істеу дағдысын қалыптастыратын негізгі құрал. Оқыту нәтижесінде қызметкерлер өз қызметінің қауіпті жақтарын жақсы түсініп, олардан сақтану амалдарын меңгереді[1].

Оқыту жүйесі қызметкерлерге (жұмысшыларға) белгілі болған фактілерді талдау жүргізуді үйретеді, бұл осы талдаудың негізінде дұрыс шешім қабылдауға септігін тигізеді[2].

Зерттеу мақсаты мен міндеттері

Мақсаты: еңбек қорғау бойынша оқыту жүйелеріне микролернинг әдісін енгізудің теориялық негіздерін айқындап, оның тиімділігін көрсету.

Міндеттері:

1. Дәстүрлі еңбек қорғау оқыту жүйелерінің артықшылықтары мен шектеулерін талдау;
2. Микролернинг әдісінің педагогикалық және практикалық ерекшеліктерін анықтау;
3. Микролернингті енгізу үлгісін ұсыну;
4. Микролернинг әдісін қолданудың еңбек қорғау саласындағы тиімділігін бағалау.

Әдіснамалық негіз

Еңбек қорғау саласында қызметкерлерді оқыту – өндірістік қауіпсіздікті қамтамасыз етудің негізгі тетігі болып табылады. Қазақстан Республикасының еңбек қорғау және өнеркәсіптік қауіпсіздік жөніндегі нормативтік-құқықтық актілерінде әрбір қызметкерді еңбек қауіпсіздігі ережелерімен таныстыру, жоспарлы оқыту және біліктілігін арттыру талаптары нақты бекітілген. Дәстүрлі оқыту әдістері (дәріс, семинар, нұсқаулық беру, тестілеу) қызметкерлердің еңбек қауіпсіздігі ережелерін меңгеруіне мүмкіндік беріп, жалпы теориялық базаны қалыптастырады. Алайда бұл тәсілдердің шектеулі тұстары бар: ақпараттың көлемділігі, есте сақтаудың төмендігі және қызметкерлердің назарын ұзақ уақыт бойы шоғырландыру қиындығы.

Зерттеу барысында салыстырмалы талдау, модельдеу және тәжірибелік-бағалау әдістері қолданылды. Еңбек қорғау бойынша оқытуға арналған халықаралық тәжірибелер зерделеніп, отандық ұйымдардағы дәстүрлі оқыту әдістерімен салыстырылды.

Осыған байланысты оқытудың заманауи тәсілдерінің бірі – микролернинг әдісін енгізу тиімділікті арттырудың қосымша құралы бола алады. Микролернинг қысқа, мазмұнды және мақсатты модульдер арқылы қызметкерлерге нақты қауіпсіздік талаптарын жылдам әрі тиімді жеткізуге мүмкіндік береді[3]. Бұл әдіс дәстүрлі оқытуға толықтыру ретінде қолданылған жағдайда:

- ✓ өндірістік жарақаттар мен жазатайым оқиғалардың алдын алуға,
- ✓ қызметкерлердің қауіпсіздік ережелерін есте сақтау деңгейін арттыруға,
- ✓ еңбек қауіпсіздігін сақтау мәдениетін қалыптастыруға ықпал етеді.

Микролернинг арқылы жұмысшылар қауіпсіздіктің құндылығын күнделікті еңбек тәжірибесінде сезініп, нормативтік талаптарды тек формалды міндет емес, кәсіби жауапкершіліктің маңызды бөлігі ретінде қабылдай алады. Бұл өз кезегінде Қазақстан Республикасының еңбек қорғау саласындағы заңнамалық талаптарын орындауға ғана емес, сонымен қатар өндірістегі жалпы қауіпсіздік деңгейін жаңа сапаға көтеруге мүмкіндік беретіні айқын.

Сонымен қатар, микролернинг әдісінің тиімділігін айқындау мақсатында еңбек қорғау саласында қызмет ететін мамандар арасында шағын сауалнама жүргізілді.

Мамандардың пікірінше, еңбек қауіпсіздігі бойынша жүргізілетін оқыту тек формалды емес, нақты тәжірибеге негізделген, өндірістік ерекшеліктерді ескеретін мазмұнда болуы тиіс. Оқыту үдерісі интерактивті тәсілдермен, тренингтер, кейс-талдау, практикалық сабақтар арқылы жүзеге асырылғанда тиімділігі артады.

Нәтижелер мен талдау

1. Дәстүрлі оқыту жүйесінің ерекшеліктері

Қызметкерлерге арналған нұсқамалар мен курстар көбінесе ұзақ уақытты талап етеді және үлкен ақпарат ағынын қамтиды. Мұндай формат

тыңдаушылардың ақпаратты есте сақтауын күрделендіріп, алынған білімді тәжірибеде қолдануды шектейді.

1 – Кесте. Дәстүрлі оқыту жүйесінің артықшылықтары мен кемшіліктері

Көрсеткіш	Артықшылықтары	Шектеулері
Нормативтік негіз	Еңбек қорғау саласындағы нормативтік актілер мен заңнамалық актілерге толықтай сәйкес келеді	Формалды сипатта өтуі мүмкін, қызметкер мотивациясы төмен болуы ықтимал.
Құрылымдылығы	Жүйелі: кіріспе нұсқаулық, жұмыс орнындағы алғашқы, әр маманды саласы бойынша атқарылатын қосымша нұсқамалар	Барлық қызметкерлер үшін бірдей мазмұн ұсынылады, нақты жағдайға бейімделмейді.
Оқыту әдістері	Дәріс, семинар, нұсқаулық, бейнематериалдар арқылы кең көлемде ақпарат беріледі	Ақпарат көлемді, есте сақтау деңгейі төмен, тәжірибелік дағдыны аз қамтиды.
Бақылау жүйесі	Міндетті тестілеу және тексеру нәтижесінде білім бағаланады	Нәтижені бағалау көбіне формалды, шынайы тәжірибені толық көрсетпейді.
Жүйелілік	Белгілі бір мерзім сайын оқыту арқылы білім жаңартылады	Қайта оқыту да мотивациясыз өтуі мүмкін, қызметкер қызығушылығын арттырмайды.
Қауіпсіздік мәдениетіне әсері	Қызметкерлерді жалпы қауіпсіздік талаптарымен таныстырады	Қауіпсіздікті ішкі құндылық ретінде қабылдауды әрдайым қалыптастырмайды.

2. Микролернинг әдісінің артықшылықтары

- ✓ Ақпарат шағын модульдер (5–10 минут) түрінде беріледі;
- ✓ Қызметкерлерге мобильді қосымшалар, қысқа бейнематериалдар мен интерактивті тестілер арқылы қолжетімді;
- ✓ Үздіксіз білім алуға және қызметкердің жеке кестесіне икемделуге мүмкіндік береді;
- ✓ Қауіпсіздік талаптарын күнделікті тәжірибеде бекітуді жеңілдетеді.

2 – Кесте. Дәстүрлі оқыту мен микролернингтің салыстырмалы ерекшеліктері

Көрсеткіш	Дәстүрлі оқыту жүйесі	Микролернинг әдісі
Нормативтік сәйкестік	ҚР заңнамасына сәйкес міндетті, ресми талаптарды орындайды.	Дәстүрлі оқытуға қосымша ретінде енгізіліп, заң талаптарын тәжірибеде тиімді іске асыруға көмектеседі.
Оқыту форматы	Дәріс, семинар, нұсқаулық, бейнематериалдар.	Қысқа бейнероликтер, интерактивті тесттер, мобильді қосымша арқылы шағын модульдер.
Ақпарат көлемі	Кең, жүйелі, бірақ көлемді ақпаратты есте сақтау қиын.	Нақты, шағын блоктарда ұсынылады, есте сақтауға жеңіл.
Уақыты мен қолжетімділігі	Белгілі бір мерзімде өткізіледі, жұмыс уақытынан тыс ұйымдастырылуы мүмкін.	Қызметкерге ыңғайлы уақытта, кез келген құрылғыдан қолжетімді.
Қызметкер мотивациясы	Кейде формалды өтеді, қызығушылық төмен болуы ықтимал.	Қысқа әрі динамикалық формат мотивацияны арттырады.
Нәтижені бағалау	Тестілеу арқылы формалды түрде жүзеге асады.	Интерактивті тапсырмалар арқылы нақты нәтижені көрсетеді.
Қауіпсіздік мәдениетіне әсері	Жалпы талаптарды жеткізеді, бірақ құндылық ретінде қабылдау әлсіз.	Қауіпсіздікті күнделікті тәжірибеде маңызды құндылық ретінде қалыптастырады.

3. Ұсынылған үлгі

Микролернингті еңбек қорғау саласында енгізудің үш кезеңдік үлгісі ұсынылады:

✓ **Ақпаратты модульдеу** – еңбек қорғау талаптары шағын тақырыптық блоктарға бөлінеді;

✓ **Интерактивті мазмұн** – бейнекурс, инфографика, қысқа викториналар әзірленеді;

✓ **Бағалау және кері байланыс** – әр модульден кейін тестілеу жүргізіліп, нәтижелер негізінде оқыту бағдарламасы бейімделеді.

✓ Практикалық тиімділік

Сауалнама нәтижелері бойынша, микролернинг әдісін қолданып оқытылған қызметкерлердің 78%-ы қауіпсіздік нормаларын күнделікті тәжірибеде қолдану деңгейін арттырғанын көрсетті. Сонымен қатар, өндірістегі қателіктер санының

азаюы, оқыту шығындарының қысқаруы және персоналдың оқуға қызығушылығының өсуі байқалды.

Қорытынды

Еңбек қорғау бойынша оқыту жүйелеріне микролернинг әдісін енгізу – заманауи білім беру технологияларын тиімді пайдаланудың үлгісі болып табылады. Ол дәстүрлі әдістерді толықтыра отырып, қызметкерлердің кәсіби құзыреттілігін арттыруға, ұйымдарда қауіпсіздік мәдениетін қалыптастыруға және өндірістегі тәуекелдерді азайтуға ықпал етеді.

Ұсыныстар:

- Микролернинг әдісін еңбек қорғау бойынша корпоративтік оқыту бағдарламаларына кезең-кезеңімен енгізу;
- Өртүрлі салаларға бейімделген мультимедиялық модульдер әзірлеу;
- Оқыту нәтижелерін тұрақты бағалау және цифрлық платформа арқылы деректерді талдау.

Әдебиеттер тізімі

1. Қалиев С. Ж., Құсайынов А. С. Еңбекті қорғау және қауіпсіздік техникасы: оқу құралы. – Алматы: Қазақ университеті, 2021. – 224 б.
2. Сырлыбекқызы С. Еңбекті қорғау: Оқу құралы (2-ші бас.). Алматы: ЖК «LP- Zhasulan», 2021. – 184 б.
3. [7 преимуществ микрообучения, о которых нужно знать. Курсы семинары тренинги](#) (өтініш берілген күн 12.08.2025 ж).
4. Еңбек қауіпсіздігі және оны қамтамасыз ету жүйелері / А. М. Сәрсенбаев, Ж. Е. Төлеуов. – Алматы: Эверо, 2019. – 200 б.

УДК 338.28

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДАҒЫ ЖОБАЛАРДЫ БАСҚАРУ СТАНДАРТТАРЫ: ЖАЙ-КҮЙІ ЖӘНЕ ДАМУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

Габелашвили К.Р., Тулегенова С.К., Нурмуратова Л.С.

Ғ.Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан

e-mail: gkakha@mail.ru, saule_kuanyshkyzy@mail.ru, nurslaura@gmail.com

Аннотация: Мақалада Қазақстан Республикасындағы жобаларды басқару тәжірибесінде қолданылатын халықаралық және ұлттық стандарттар қарастырылады. Негізгі назар PMBOK, PRINCE2, ISO 21500 және IPMA стандарттарының мазмұны мен артықшылықтарына аударылады. Сонымен қатар, Қазақстандағы мемлекеттік бағдарламалар мен ұлттық компанияларда

қолданылып жүрген жобаларды басқару тәжірибесі сипатталады. Елдің экономикалық дамуы мен стратегиялық мақсаттарына жету үшін жобаларды басқарудың бірыңғай стандарттарын енгізудің маңызы талқыланады.

Тұрақсыз нарықтық орта жағдайында кәсіпорындардың қызметі кезең-кезеңімен жобалық бағытқа айналып бара жатыр, ал кәсіпорындардың барлығы дерлік жаңа жобаларды басқару моделіне көшуде. Үнемі жұмыс істеп жатқан ұйымдарда жобаларды басқару стандарттарына негізделген басқарушылық мүмкіндіктерді қалай құруға назар аударады.

Кілт сөздер: жоба, жобаларды басқару, PMBOK, PRINCE2, ISO 21500, IPMA, KZ CT ISO 21502-2022, ұлттық стандарттар.

Кіріспе

Қазіргі Қазақстан экономикасында жобаларды басқару әдіснамасын енгізу маңызды рөл атқарады. Мемлекеттік секторда да, жекеменшік ұйымдарда да жобалық тәсіл қолдану нәтижелілік пен тиімділікті арттыруға мүмкіндік береді.

Қазақстан экономикасы белсенді дамып келе жатқан ел ретінде энергетикадағы, құрылыстағы, IT-саласындағы, білім беру мен мемлекеттік басқарудағы бағдарламаларды басқару үшін жобалық тәсілді кеңінен пайдалануда. Алайда тиімділікті арттырудың маңызды шарты жобалық менеджменттің танылған халықаралық стандарттарын пайдалану болып табылады.

Қазақстанда жобаларды басқарудың халықаралық стандарттарына негізделген әдіснамалар белсенді түрде енгізіліп жатыр. Бұл әсіресе мемлекеттік бағдарламаларды жүзеге асыруда, инфрақұрылымдық жобаларды басқаруда және цифрландыру процесінде өзекті.

Жобаларды басқару стандарттары ұйымдарға процестерді жүйелеуге, тәуекелдерді азайтуға және нәтижелерді болжамды етуге жағдай жасайды. Әлемдік тәжірибеге сүйене отырып, Қазақстандағы компаниялар мен мемлекеттік органдар жобаларды басқаруда халықаралық стандарттарды бейімдеуде.

Халықаралық стандарттардың Қазақстандағы қолданысы

Қолдану саласы мен әзірлеу тәртібіне сәйкес халықаралық, ұлттық, өңірлік стандарттар жүйелері, жекелеген ұйымдардың стандарттары (ұжымдық стандарттар) және жекелеген жобалардың стандарттары болып ажыратылады. Егер стандарттауға кез - келген елдің тиісті органдары қатыса алса, онда бұл - халықаралық стандарттау. Аймақтық стандарттау-әлемнің бір географиялық, саяси немесе экономикалық аймағындағы мемлекеттерінің тиісті органдарына ғана арналған қызмет. Ұлттық стандарттау әр түрлі деңгейде жүзеге асырылуы мүмкін белгілі бір мемлекеттегі қызметпен шектеледі: мемлекеттік, салалық, экономиканың белгілі бір секторы, қауымдастықтар, өндірістік фирмалар, кәсіпорындар мен мекемелер. Заңның ережелеріне сәйкес, басқаруға қатысты стандарттар ұйымдарға міндетті емес. Ұйым өз еркімен стандарттардың талаптарын орындауға міндеттеме ала алады, бұл оған өз қызметін немесе

өнімдерін жетілдіруге және жаңа бәсекелестік артықшылықтарға ие болуға мүмкіндік береді. Объектілердің стандарттар талаптарына сәйкестігі арнайы орган жүзеге асыратын сертификаттау процесінде расталады.

Сертификаттау жөніндегі орган - сертификаттау жөніндегі жұмыстарды орындау үшін белгіленген тәртіппен аккредиттелген заңды тұлға немесе жеке кәсіпкер[1].

Стандарттау объектісі бойынша стандарттардың алты тобы бар:

- жобаларды басқару стандарттары;
- жоба портфолиосын басқару стандарттары;
- бағдарламаларды басқару стандарттары;
- бағдарламалар мен жоба портфолиосын басқару стандарттары;
- жоба менеджерінің құзыреттілігін бағалау стандарттары;
- білім салалары бойынша жобаларды басқару стандарттары.

Жобаларды басқару саласындағы стандарттар, менеджмент саласындағы көптеген стандарттар сияқты, еркін (немесе ашық) стандарттың келесі принциптері негізінде қолданылады:

- 1) қол жетімді болу, яғни барлығы оқып, іске асыра алады;
- 2) таңдауды барынша арттыру. Ашық стандарт стандартты іске асыру үшін әділ бәсекелестік орнаған нарық жасайды. Ол тұтынушыны белгілі бір жеткізушіге немесе жеткізушілер тобына байланыстырмайды;
- 3) лицензиялық аударымдардың болмауы. Ашық стандарттарды кез-келген лицензиялық аударымдарсыз немесе төлемдерсіз барлығы еркін жүзеге асыра алады. Стандартқа сәйкестікті сертификаттау үшін ақы талап етілуі мүмкін;
- 4) кемсітушіліктің болмауы. Ашық стандарттар мен оларды басқаратын ұйымдар стандарттың 5 талабына техникалық сәйкестігінен басқа кез келген себептер бойынша бір іске асыруға басқаларға қарағанда артықшылық бермеуі керек. Сертификаттау органдары арзан және тегін сатылымдарға сәйкестігін растау мүмкіндігін ұсынады. Олар қосымша сертификаттау қызметтерін де ұсына алады;
- 5) кеңейтулер мен ішкі жиындар. Ашық стандартты енгізу стандартпен салыстырғанда кеңейтілуі немесе стандарттың бір бөлігі ретінде ұсынылуы мүмкін. Алайда, сертификаттаушы ұйымдар ішінара іске асыруды сертификаттаудан бас тартуы және кеңейтуге шектеулер қоюы мүмкін[2].

Стандарттарды кім жасайтынын қарастырайық. Стандарттарды корпоративтік және жекелеген жобалардың стандарттарынан басқа стандарттау жөніндегі мамандандырылған ұйымдар әзірлейді. Халықаралық деңгейде стандарттаудың ең беделді органы - Халықаралық стандарттау ұйымы (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR Standardization – ISO). Бұл 1947 жылы құрылған тәуелсіз, үкіметтік емес ұйым. 2016 жылға қарай ол 21 мыңнан астам халықаралық стандарттарды әзірледі, мақұлдады және жариялады, олар технология мен бизнестің азық-түлік қауіпсіздігінен бастап компьютерлерге, ауыл шаруашылығына және денсаулық сақтауға дейін барлық дерлік аспектілерін қамтиды.

Халықаралық стандарттарды техникалық комитеттер ISO/IEC "Халықаралық стандарттарды құру және қалыптастыру ережелері" деп аталатын ISO бекіткен ережелерге сәйкес әзірлейді. Халықаралық стандарттар ретінде жариялау үшін дауыс беруге қатысатын ИСО-ға мүше ұйымдардың кем дегенде 75% - ы оларды мақұлдауы керек.

2011 жылы ИСО ISO 21500: 2012 жобаларын басқарудың халықаралық стандартын шығарды. Жобаларды басқару стандарттарын әзірлеумен айналысатын ең танымал ұйым-1969 жылы құрылған халықаралық коммерциялық емес ұйым Жобаларды басқару институты (Project Management Institute - PMI), 170-тен астам елде ұсынылған. PMI мақсаттары жоба менеджерлерінің тәжірибесімен, білімімен және дағдыларымен алмасу, сертификаттау бағдарламалары (CAPM, PMP, PgMP) арқылы жобаларды басқаруда кәсібилікті дамыту болып табылады. PMI орыс тіліндегі нұсқада ИСО аббревиатурасы қолданылады.

PMI сарапшылары әзірлеген PMBOK стандарты бүкіл әлем бойынша жобаларды басқару тәжірибесінде ең кең таралған және кейінірек пайда болған стандарттардың көпшілігінің негізі болып табылады. 1965 жылы Цюрихте (Швейцария) коммерциялық емес кәсіби қауымдастық ретінде құрылған халықаралық жобаларды басқару қауымдастығының (International Project Management Association - IPMA) стандарттары тәжірибеде кеңінен қолданылды. Ол әлемнің барлық континенттерінен 50 ұлттық жобаларды басқару қауымдастықтарын біріктіреді[3].

IPMA жобаларын басқарудың негізгі стандарты - ICB-IPMA Competence Baseline, version 3.0, ол жобаларды, бағдарламаларды және жоба портфелін басқару үшін жоба менеджерлері мен жоба командаларының мүшелеріне қажет құзыреттілік талаптарын сипаттайды.

1. PMBOK (Project Management Body of Knowledge)

PMBOK стандарты Қазақстандағы көптеген ұлттық компанияларда кеңінен қолданылады. «ҚазМұнайГаз», «KEGOC», «Самұрық-Қазына» қоры сияқты ірі ұйымдар жобаларды басқаруда PMBOK қағидаттарын енгізуде. Оның басты артықшылығы - процестерді нақты құрылымдау, тәуекелдерді басқару және сапаны қамтамасыз ету.

PMBOK негізінде Қазақстанда жобаларды басқару бойынша оқыту бағдарламалары әзірленіп, кәсіби сертификаттау жүйесі енгізіліп отыр.

2. PRINCE2 (Projects IN Controlled Environments)

PRINCE2 стандарты Қазақстанда әсіресе IT саласында және мемлекеттік қызмет жобаларында қолданылуда. Бұл әдіс нақты рөлдер мен жауапкершіліктерді анықтап, нәтижеге бағытталған басқару қағидаттарын енгізеді. Мысалы, электронды үкімет, цифрлық қызметтерді дамыту жобаларында PRINCE2 қағидаттары кеңінен қолданылады.

3. ISO 21500

Қазақстан ISO 21500 халықаралық стандартының талаптарын ресми түрде қабылдаған мемлекеттердің қатарында. Бұл стандарт жобаларды басқарудың

әмбебап құрылымын береді және әртүрлі салаларда бейімдеуге мүмкіндік береді. ISO 21500 әсіресе мемлекеттік бағдарламаларда, құрылыс және энергетика жобаларында қолданылады[4].

4. IPMA ICB (International Competence Baseline)

IPMA стандарты Қазақстандағы жобаларды басқару мамандарының кәсіби даярлығын бағалау кезінде қолданылады. Қазақстандық жобаларды басқару қауымдастығы (KZPMA) осы бағытта IPMA-мен серіктестік орнатып, халықаралық деңгейде сертификаттау жүргізіп келеді. Бұл мамандардың құзыреттілігін халықаралық деңгейде мойындауға мүмкіндік береді[5].

Қазақстан Республикасында қолданылатын жобаларды басқару ұлттық стандарттары

ҚР Жобалық менеджерлер одағы жобалық басқару бойынша екі жаңа ұлттық стандарттың әзірлеушісі болды.

Соңғы он жылда жобалық менеджмент Қазақстанда да белсенді түрде ілгерілеп жатыр. Жобаға бағдарланған, өз мамандарының біліктілігін арттырумен айналысатын, корпоративтік жүйелерді енгізетін және жобаларды басқару кеңселерін ашатын компаниялар саны артып келеді. Жобалық менеджменттің міндеттері компаниялар мен ұйымдардың ағымдағы процестеріне, ұйымдық құрылымдарға, оларды дамыту стратегияларына байланысты.

Жобаларды басқару технологиясын, ең алдымен, ел аумағында жұмыс істейтін ірі ұлттық, сондай-ақ шетелдік және халықаралық компаниялар қолданады. ҚР бірқатар министрліктерінің қызметіне жобалық тәсілді енгізу процесі жүріп жатыр. Мемлекеттік сектордағы жобаларды басқару құралдары өмірлік маңызды деп санала бастады.

2016 жылғы қаңтардан бастап ISO 21500:2012 халықаралық стандартын үйлестіру арқылы қабылданған ҚР СТ ISO 21500-2014 ұлттық стандарты жобаларды басқару жөніндегі Нұсқаулық қолданылады. Бұл ұлттық стандартты мемлекеттік, квазимемлекеттік және бизнес-секторлардың құрылымдары белсенді қабылдады. Дәл осы стандарт негізінде қазіргі уақытта ҚР бірқатар министрліктерінің қызметіне жобалық тәсілді енгізу процесі жүріп жатыр.

Бүгін Қазақстан Республикасының Жобалық менеджерлер одағы 2016 жылғы 18 қарашада ҚР Инвестициялар және даму министрлігі Техникалық реттеу және метрология комитетінің бұйрығымен жобалық менеджмент сериясының тағы екі ұлттық стандарты бекітілгенін қуана хабарлайды:

- ҚР СТ - жобалық менеджмент. Жобаны басқаруға қойылатын талаптар;
- ҚР СТ ISO 21504-2016-Жоба, бағдарлама және портфельді басқару.

Портфельді басқару жөніндегі Нұсқаулық.

Екі стандартты қабылдаудың бастамашысы және әзірлеушісі - ҚР Жобалық менеджерлер одағы.

Стандарттар 2018 жылдың 1 қаңтарынан бастап қолданысқа енгізілді.

ҚР СТ стандартын қабылдаудың мақсаты - жобалық менеджмент. Жобаны басқаруға қойылатын талаптар - ұйымның менеджмент жүйелерін сертификаттау

саласын кеңейту. Жаңа стандарт бойынша ұйымдар жобаларды басқару жүйесін сертификаттаудан өте алады. Ол үшін стандартта 1-бөлімде қолдану аясы көрсетілген: "Осы стандартты жобаны басқарудың Стандартта белгіленген талаптарға сәйкестігін бағалау (растау) мақсатында пайдалануға болады"[6].

Бұдан басқа, көрсетілген стандарт ҚР СТ ISO 21500-2014 қолданыстағы стандартын толықтырады. Атап айтқанда, ол жобаны басқару бойынша қосымша бірнеше терминдерді ұсынады, сонымен қатар жоба құжаттарын басқаруға қойылатын талаптардың тізімін береді.

ҚР СТ ISO 21504-2016 екінші ұлттық стандартының мақсаты-жоба, бағдарлама және портфельді басқару. Портфельді басқару жөніндегі Нұсқаулық - жоба портфолиосын басқару және басқару үшін қажетті ұйымның терминологиясы мен алғышарттарына қойылатын талаптарды белгілеу[7].

Жобалар мен бағдарламалар портфелін басқару ұйымның тиімділігін қамтамасыз ету үшін ұйымның стратегиясын қолдауға және жүзеге асыруға арналған. Осы тұрғыда бұл стандарт ұйымның тактикалық және стратегиялық мақсаттарына қол жеткізуді қамтамасыз ете алатын жобаларды портфолиоға іріктеуге мүмкіндік береді. Стандарт таңдалған жобалардың орындалуын қалай бақылау керектігін, әдетте әрқашан шектеулі болатын ұйымның ресурстарын олардың арасында бөлуді және ресурстарды тиімді және нәтижелі пайдалануды қамтамасыз етуді түсіндіреді. Стандарт портфельді басқарудың теңдестірілген тәсілін белгілейді, яғни қысқа мерзімді және ұзақ мерзімді жобалар арасындағы тепе-теңдікке қол жеткізу, жобалардың тәуекелдері мен оларды жүзеге асырудан түсетін ықтимал кірістер, портфолиоға жаңа жобаларды қосу немесе пайдасыз немесе аз тиімді жобаларды жабу туралы шешім қабылдау.

Стандарт портфолио жобаларының талаптарын ұйымның операциялық қызметімен, әртүрлі функционалды бөлімшелермен өзара әрекеттесумен қалай үйлестіру керектігін, жобалардың үнемі өзгеріп отыратын қажеттіліктері жағдайында жобаларды басқарудың тұрақты және тиімді механизмін қалай қамтамасыз ету керектігін, барлық деңгейдегі басшыларға шешім қабылдау үшін ақпарат пен ұсыныстар беруді түсіндіреді.

Тұтастай алғанда, қабылданған стандарттарды пайдалану ұйымға жобаларды іске асыруға бөлінген қаражатты мақсатсыз пайдалануды азайтуға мүмкіндік беретінін атап өткен жөн.

Мемлекетте жобаларды, бағдарламаларды және портфельді басқарудың бірыңғай тәсілдері мен қағидаттарын қалыптастыру, жобалық менеджмент саласындағы кәсіби ұйымдарды ұлғайту Қазақстан Республикасында инновациялық процестерді дамытуға ықпал ететін "құрылыс блоктарының" бірі екендігіне күмән жоқ. «Жобалық басқару кодексі» аясында жүйелі тәсіл енгізілді: Ұлттық жобалық басқару жүйесі қалыптастырылып, мемлекеттік басымдықтарды үйлестіру үшін Ұлттық жобалық офис құрылды.[9]

Классикалық және agile-подходтарды үйлестіретін аралас үлгілер қолданылады, сондай-ақ салалық стандарттар енгізілді: KZ СТ ISO 21502-2022 (жобаларды басқару жөніндегі басшылық), СТ РК ISO 21503-2018 (бағдарламаларды басқару).

Қазақстан жобалық менеджерлер одағы және ҚР ТРМ әзірлеген ұлттық стандарттар:

- **СТ РК ISO 21500-2014** - жобаларды басқару жөніндегі басшылық
- **СТ РК - Жобалық менеджмент. Жобаны басқаруға қойылатын талаптар** (2016)
- **СТ РК ISO 21504-2016** - жобалар, бағдарламалар және портфельдерді басқару жөніндегі нұсқаулық
- **СТ РК ISO 21505-2018** - бағдарламаларды басқару
- **СТ РК ISO 21508-2019** -ресурстарды игеруді басқару
- **СТ РК ISO 21511-2019** - жұмыстарды құрылымдау (Work Breakdown Structure). [10]

– Бұл стандарттар ертеректегі ISO 21500-2014 құжатын алмастырды, алайда соңғысы әлі де мемлекеттік және бизнес құрылымдарда жиі қолданылады. [11]

Жақында **KZ CT ISO 21502-2022** ұлттық стандарты ресми түрде енгізілді. Бұл бағытта сертификаттау семинарлары өткізіліп, мамандарды даярлау жұмыстары жүргізілуде (мысалы, 2025 жылдың наурыз және шілде айларында Қостанай облысында өткен семинарлар).

Жаңа стандарттардың құрылымы мен мазмұны

Стандарт	Мазмұны мен мақсаты
ISO 21502-2022	Заманауи жобалық менеджмент жөніндегі басшылық
ISO 21504-2016	Портфельдер мен бағдарламаларды басқару жөніндегі нұсқаулық
ISO 21508-2019	Ресурстарды игеру деңгейін бақылау
ISO 21511-2019	Жұмыстарды құрылымдау (WBS)
PMBOK / ISO 21503-2018	Бағдарламалық басқаруды интеграциялау
IPMA ICB / PMI Gov	Мемлекеттік секторға арналған біліктілік талаптары
GPM P5™	Жобалық басқарудағы тұрақты даму стандарты

Жаңа стандарттар Қазақстанда жобаларды басқарудың бірыңғай архитектурасын құруға ықпал етеді:

- **Тәсілдерді біріздендіру** - мемлекеттік, инфрақұрылымдық, IT және басқа салаларда
- **Шешім қабылдауды қолдау** - бағалау мен бақылаудың нақты әдістемелері
- **Кәсібилікті арттыру** - менеджерлердің құзыреттіліктеріне қойылатын талаптар
- **Тұрақты даму қағидаттары** - GPM P5™ сияқты стандарттар ESG-қағидаларын енгізеді. [12]

Стандарттарды енгізудің маңызы

Жобаларды басқару стандарттарының енгізілуі Қазақстан үшін бірнеше артықшылық береді:

1. **Тиімділік** - ресурстарды үнемді пайдалану, уақытты қысқарту.
2. **Сапа** - жобаның нәтижесін халықаралық талаптарға сәйкестендіру.

3. **Бәсекеге қабілеттілік** - отандық компаниялардың халықаралық нарыққа шығуына мүмкіндік беру.

4. **Кәсіби кадрлар даярлау** - жобаларды басқару саласында мамандардың құзыреттілігін арттыру.

Халықаралық тәжірибеге сүйену Қазақстандағы жобалардың сәтті жүзеге асырылуына жағдай жасайды.

Қорытынды

Қазақстанда жобаларды басқару халықаралық стандарттарының қолданылуы экономикалық даму үшін стратегиялық мәнге ие. PMBOK, PRINCE2, ISO 21500 және IPMA стандарттары мемлекеттік және жекеменшік секторда жобаларды тиімді басқарудың негізін құрайды.

Алдағы жылдары Қазақстан үшін басты міндет - ұлттық деңгейде жобаларды басқарудың бірыңғай жүйесін қалыптастыру, оны барлық салада енгізу және мамандарды халықаралық талаптарға сәйкес даярлау.

Пайдаланылған әдебиеттер

1. Cristóbal JRS. Complexity in Project Management. International Conference on enterprise Information Systems (Centeris) / International Conference on Project Management (ProjMAN). 2017. 121.762-766.

2. Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge, 6th ed.; Project Management Institute: Newtown Square, PA, USA. 2017.

3. Zwikaël O, Gilchrist A. Planning to fail: When is project planning counterproductive? IEEE Transactions on Engineering Management 2022. pp. 1-12.

4. Ma G, Jia J, Ding J, et al. Examining the impact of social media use on project management performance: Evidence from construction projects in China[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2021 . 147(3): 04021004.

5. Павлов, А. Н. Управление проектами на основе стандарта PMI PMBOK®. Изложение методологии и опыт применения: практическое руководство / А. Н. Павлов. - 7-е изд. - Москва : Лаборатория знаний, 2021. – 274 с.

6. Project Management Institute (PMI). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*.

7. ISO 21500:2012. *Guidance on project management*.

8. IPMA. *International Project Management Association Competence Baseline*.

9. Қазақстандық жобаларды басқару қауымдастығы (KZPMA) ресми сайты – www.kzpmakz

10. «Жобалық басқаруды жүзеге асыру қағидаларын бекіту туралы» – Әділет, 2023 (adilet.zan.kz)

11. «Мемлекеттік органдарды жобалық басқарудың үлгілік регламентін бекіту» – Әділет, 2022 (adilet.zan.kz)

12. Қазақстан жобалық менеджерлер одағы: ұлттық стандарттар 2016–2019 (spmrk.kz)

ӘОЖ 504.062.2; 631.9

«ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДАҒЫ МҰНАЙ ӨНДІРУ КӘСІПОРЫНДАРЫНЫҢ АҒЫНДЫ СУЛАРЫН ТАЗARTУ МӘСЕЛЕЛЕРІНІҢ ТАЛДАУЫ»

Алибек Ш.Б., Жандаулетова Ф.Р.*

Ғ.Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,

Алматы қ., Қазақстан

e-mail: sha.alibek@aes.kz

*e-mail: f.zhandauletova@aes.kz

Андатпа: Қазақстандағы мұнай өңдеу кәсіпорындарының өндірістік қызметі тек экономикалық өсімнің негізі ғана емес, сонымен қатар қоршаған ортаға айтарлықтай экологиялық жүктеме көзі болып отыр. Әсіресе ағынды сулар мәселесі соңғы жылдары өзекті сипатқа ие болды. Мұнай өнімдері мен фенолдардың жоғары концентрациясы, жабдықтардың тозуы және тазарту технологияларының артта қалуы экожүйелердің тұрақтылығына қауіп төндіруде. Мақалада еліміздегі негізгі мұнай өңдеу зауыттарының (Атырау, Павлодар, Шымкент) ағынды суларын тазарту жүйелерінің қазіргі жағдайы қарастырылды. Лабораториялық талдаулар нәтижесінде негізгі ластаушы заттардың деңгейі анықталды, олардың ШРК-дан бірнеше есе асып түсетіні дәлелденді. Халықаралық тәжірибеге сүйене отырып, мембраналық технологияларды енгізу, онлайн-мониторинг жүйелерін орнату және тазартылған суды қайта пайдалану бойынша ұсыныстар берілді.

Кілт сөздер: ағынды сулар, мұнай өндіру, экологиялық қауіпсіздік, тазарту құрылыстары, мұнай өңдеу зауыты, мембраналық технологиялар, ШРК.

Кіріспе

Қазақстан мұнай өндіру және өңдеу саласында ТМД бойынша жетекші орындардың бірін алады. Атырау, Павлодар және Шымкент мұнай өңдеу зауыттары жылына 17 млн тоннадан астам шикізат қайта өңдейді. Бұл ел экономикасына оң әсер етсе де, экологиялық мәселелерді күшейтуде. [1]

Ағынды сулардың сапасы – негізгі проблемалардың бірі. Олардың құрамында мұнай өнімдері, органикалық қосылыстар, ауыр металдар мен фенолдар бар. Бұл заттар экожүйелерді ластап, адамның денсаулығына қауіп

төндіреді. [2] Қазақстандағы тазарту жүйелері кеңестік кезеңде орнатылған ескі жабдықтарға сүйенеді, олардың 60–70%-ы тозған. Қазіргі заманғы автоматтандырылған бақылау мен мембраналық сүзу технологиялары іс жүзінде қолданылмайды. Сондықтан тазартылған су санитарлық талаптарға сәйкес келмейді.

Зерттеудің өзектілігі – өндірістік ағынды суларды тиімді тазартудың жаңа әдістерін енгізу қажеттілігінде. Бұл үшін Қазақстандағы экологиялық саясаттағы олқылықтарды жою және халықаралық тәжірибені пайдалану маңызды.

Зерттеу аналитикалық және салыстырмалы әдістермен жүргізілді. Негіз ретінде Атырау, Павлодар, Шымкент зауыттарының ресми құжаттамалары мен соңғы экологиялық есептері, сондай-ақ ҚР Экологиялық кодексі (2021), Су кодексі (2025), ұлттық және халықаралық деректер қолданылды [3. 4].

Ғылыми нәтижелер

Зерттеу барысында Қазақстандағы негізгі мұнай өңдеу зауыттарындағы (Атырау, Павлодар, Шымкент) ағынды сулардың сапасы мен қолданыстағы тазарту құрылыстарының жағдайы талданды [5]. Өндіріс орындарының қазіргі жағдайы 1 кестеде көрсетілген.

1-кесте – Өндіріс орындарының қазіргі жағдайы

Кәсіпорын	Өнімділігі (млн т/жыл)	Тазарту әдісі	Негізгі мәселе
Атырау МӨЗ	5.5	Біріктірілген	Қондырғылар тозған
Павлодар МХЗ	6.0	Физ.-химиялық	Автоматтандырылған жүйе жоқ
Шымкент МӨЗ	6.3	Біріктірілген	Суды қайта қолдану қарастырылмаған

Бұл деректер көрсеткендей, барлық зауыттарда қолданылып отырған тазарту әдістері ескі әрі қазіргі заманғы талаптарға толық сәйкес келмейді. Әсіресе автоматтандырылған бақылаудың болмауы мен суды қайта пайдалану тәжірибесінің дамымауы негізгі проблемалар болып отыр. Ластаушы заттардың деңгейі 2-кестеде көрсетілген.

2 кесте - Ластаушы заттардың деңгейі

Көрсеткіш	Тазартуға дейін	Тазартудан кейін	ШРК
Мұнай өнімдері	34 мг/л	12 мг/л	0.3 мг/л
Фенолдар	3.1 мг/л	1.6 мг/л	0.001 мг/л
КОҚ	540 мгО ₂ /л	230 мгО ₂ /л	30 мгО ₂ /л
БПК ₅	180 мгО ₂ /л	90 мгО ₂ /л	15 мгО ₂ /л

Кестеден көріп отырғанымыздай, тазарту қондырғылары ластаушы заттардың концентрациясын төмендеткенімен, олардың деңгейі әлі де ШРК-дан бірнеше есе артық. Мысалы, мұнай өнімдері нормативтен 40 есе жоғары болса, фенолдар көрсеткіші мың еседен асады. Мұнай өңдеу зауыттарындағы ағынды суларды тазалау схемасы сурет 1- де көрсетілген.



Сурет 1 – Мұнай өңдеу зауыттарындағы ағынды суларды тазалау схемасы

Бұл схема қазіргі тазарту жүйелерінің сатыларын және болашақта енгізілуі тиіс қосымша технологияларды көрсетеді.

Қазақстанда тазартылған суды қайта пайдалану тәжірибесі жоқтың қасы, ал шетелде бұл бағыт өте тиімді жүзеге асырылып жатыр соның ішінде:

Германияда автоматтандырылған онлайн-мониторинг жүйелері мен мембраналық сүзу әдісі кеңінен енгізілген. Бұл технология нақты уақыт режимінде бақылау жүргізуге мүмкіндік береді және тазарту тиімділігі 90–95%-ға дейін жетеді. АҚШ-та мембраналық биореакторлар (MBR) мен су айналымын қайта пайдалануға арналған жүйелер қолданылады. Нәтижесінде судың тазарту деңгейі 95%-ға дейін қамтамасыз етіліп, ол өндірістік мақсатта қайталап қолданылады. Жапонияда ультрафилтрация, нанофилтрация және биологиялық әдістер тиімді қолданылуда. Бұл тәсілдердің нәтижесінде тазартылған судың 50%-дан астамы қайтадан пайдаланылады.

Қорытынды

Жүргізілген талдау нәтижелері Қазақстандағы мұнай өңдеу зауыттарының ағынды суларды тазарту жүйелері қазіргі экологиялық талаптарға толық сай еместігін көрсетті. Негізгі мәселелерге қондырғылардың ескіруі, автоматтандырылған бақылаудың болмауы және суды қайта пайдалану тәжірибесінің енгізілмеуі жатады.

Қазақстанда мұнай өңдеу кәсіпорындарының ағынды суларын тазарту жүйесін жаңғырту үшін: заманауи технологияларды кезең-кезеңімен енгізу; автоматтандырылған бақылау жүйелерін орнату; тазартылған суды қайта пайдалану тәжірибесін дамыту қажет.

Энергетика саласында қарастыратын болсақ келесі шараларды қосуға болады: энергия тиімді технологияларды енгізу; жаңартылатын энергия көздерін пайдалану. Тазарту жүйелерінде күн энергиясы, жел энергиясы немесе биомасса сияқты жаңартылатын энергия көздерін қолдану арқылы энергия тәуелділігін азайту.

Әдебиеттер тізімі

1. Radelyuk I., Tussupova K., Klemeš J.J., Persson M. Oil refinery and water pollution in the context of sustainable development: Developing and developed countries // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Article ID 126987.

2. Жұмағұлов А.Б., Сейтқазы А.Т. Қазақстан мұнай өңдеу зауыттарының экологиялық мәселелері // *Экология және тұрақты даму*. – 2022. – №3(75). – Б. 45–52.

3. Kim, J., Lee, S. Membrane bioreactor for wastewater treatment and reuse: critical review of recent developments // *Desalination*. – 2021. – Vol. 520. – P. 1–12.

4. Қазақстан Республикасының Экологиялық кодексі. – Нұр-Сұлтан: ҚР Әділет министрлігі, 2021. – 420 б.

УДК 621.311.22:502.1

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЭЦ С ЦЕЛЮ МИНИМИЗАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

**Мусаева Ж.К., Амренова А.Ж. *, Бегимбетова А.С., Сагытаева К.А.,
Жойкынбекова Ә.Т.**

Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г.
Алматы, Казахстан

* e-mail: a.amrenova@aues.kz

В статье представлен сравнительный анализ различных вариантов модернизации теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) с акцентом на минимизацию воздействия на окружающую среду, где наряду с современными технологиями повышения энергоэффективности, рассматриваются вопросы снижения выбросов парниковых газов и сокращения вредных веществ. Проведен анализ экономической целесообразности внедрения технологий, включая переход на возобновляемые источники энергии, использование газовых турбин, внедрение систем улавливания углекислого газа и модернизацию очистного оборудования. Также рассматриваются инновационные подходы к интеграции ТЭЦ в устойчивые городские энергетические системы с учетом растущих потребностей в энергии и необходимости соблюдения экологических

стандартов. Выявлены преимущества и недостатки каждого варианта с точки зрения экологической безопасности и технологической совместимости.

Ключевые слова: ТЭЦ, модернизация, снижения выбросов, природный газ, минимизация, окружающая среда.

1 Введение

Основным направлением модернизации тепловых электростанций с целью снижения негативного воздействия на окружающую среду является обеспечение требуемого уровня тепловой и электрической мощности при сохранении действующей инфраструктуры системы теплоснабжения. К ключевым задачам относятся более полное использование установленной мощности энергоисточника для покрытия присоединённой тепловой нагрузки, повышение эффективности комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, а также уменьшение выбросов загрязняющих веществ за счёт внедрения экологически чистых технологий.

ТЭЦ, являясь крупнейшим источником энергоснабжения города Алматы, представляет собой сложный объект с развитой инженерной инфраструктурой.

Поэтому оценку и сравнение вариантов её модернизации целесообразно проводить поэтапно. Одним из наиболее результативных решений является перевод станции на сжигание природного газа. Данный подход позволяет значительно снизить нагрузку на атмосферу: полностью исключаются выбросы угольной и мазутной золы, диоксида серы, а также существенно сокращается объём оксидов азота, углерода и парниковых газов. В результате выбросы загрязняющих веществ уменьшаются примерно на 80% в год.

Главная цель исследования в области энергетической безопасности заключается в определении оптимального варианта модернизации ТЭЦ, который обеспечит снижение выбросов без потери надёжности и эффективности энергоснабжения. При этом предполагается повышение экологической безопасности объекта, более эффективное использование установленной мощности, а также улучшение эксплуатационной надёжности за счёт внедрения современных технологий комбинированной выработки энергии, модернизации оборудования и оснащения станции микропроцессорными системами управления [1, с. 29-32].

2 Материалы и методы

При проведении исследований использованы теоретические и практические методы, сравнительный анализ основного оборудования для разработки проекта, метод измерения физических параметров объекта исследования, также нормативные документы [1; 2, с. 26; 3, с. 12; 7; 11]:

Рекомендуемые в настоящем проекте технологии сжигания топлива и системы газоочистки согласно [3, с. 14] обеспечат уровень содержания загрязняющих веществ после очистки на уровне требований ЕС (таблице 1).

Таблица 1 – Эмиссии загрязняющих веществ по вариантам модернизации ТЭЦ-2, мг/нм³

Показатели	Текущее состояние	Требования РК	Требования ЕС	Варианты модернизации ТЭЦ-2 по ТЭО			
				1	2	3	4
Топливо	уголь	Уголь/газ	Уголь/газ	газ	уголь	уголь	газ
NO _x	650	650/125/50*	200/100/50*	100	200	200	50
SO ₂	1500	2000	200	-	200	200	-
Зола	400	400	20	-	20	20	-

* котел на угле/ котел на газе/ газовая турбина

При выборе варианта модернизации ТЭЦ с целью минимизации воздействия на окружающую среду в рамках настоящего ТЭО при сравнении вариантов рассматриваются только выбросы в атмосферу из дымовых труб, которые составляют 99,5% в общем объеме выбросов и их последствия в период эксплуатации.

Оценка вклада выбросов выполнена путем моделирования процесса рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосфере на основании Методики расчета рассеивания, утвержденной приказом №100 МООС РК, с использованием универсальной программы расчета загрязнения атмосферного воздуха (УПРЗА) “Эколог” (версия 3.0), разработанной фирмой “Интеграл” (г. С-Петербург). Программа согласована Министерством охраны окружающей среды РК (письмо от 04.02.02 г. № 09-335) [4, с. 6].

Параметры источников выбросов ТЭЦ приняты согласно утвержденному проекту нормативов ПДВ.

В качестве критерия оценки приняты санитарно-гигиенические нормативы по содержанию загрязняющих веществ в атмосфере для населенных мест (таблица 2), установленных Минздравом РК [5, с. 96-101].

Таблица 2 – Характеристика основных загрязняющих веществ в выбросах из дымовых труб ТЭЦ-2

Код ЗВ	Наименование вещества	ПДК _{м.р.} , мг/м ³	ПДК _{с.с.} , мг/м ³	Класс опасности
0301	Азота (IV) диоксид (Азота диоксид)	0,2	0,04	3
0304	Азот (II) оксид (Азота оксид)	0,4	0,06	3
0330	Сера диоксид (Ангидрид сернистый, Сернистый газ, Сера (IV) оксид)	0,5	0,05	3
0337	Углерод оксид (Окись углерода, Угарный газ)	5,0	3,0	4
2908	Пыль неорганическая, содержащая двуокись кремния в %: 70-20 (шамот, цемент, пыль цементного производства – глина, зола угля казахстанских месторождений)	0,3	0,1	3

4008	Взвешенные частицы РМ-10	0,30	0,060	
4010	Взвешенные частицы РМ-2,5	0,16	0,035	

По результатам моделирования рассеивания максимальных выбросов ТЭЦ из дымовых труб установлено, что зона влияния выбросов при неблагоприятных метеоусловиях составляет по разным веществам порядка 15-17 км. Выбросы оседают с различной интенсивностью по мере удаления от ТЭЦ наибольшее их количество (до 60%) выпадает, в так называемой, зоне активного загрязнения, которая при неблагоприятных метеоусловиях составляет порядка 5 км от ТЭЦ (рис. 1). Это зона максимальных приземных концентраций от ТЭЦ. По мере удаления от ТЭЦ влияние выбросов снижается.

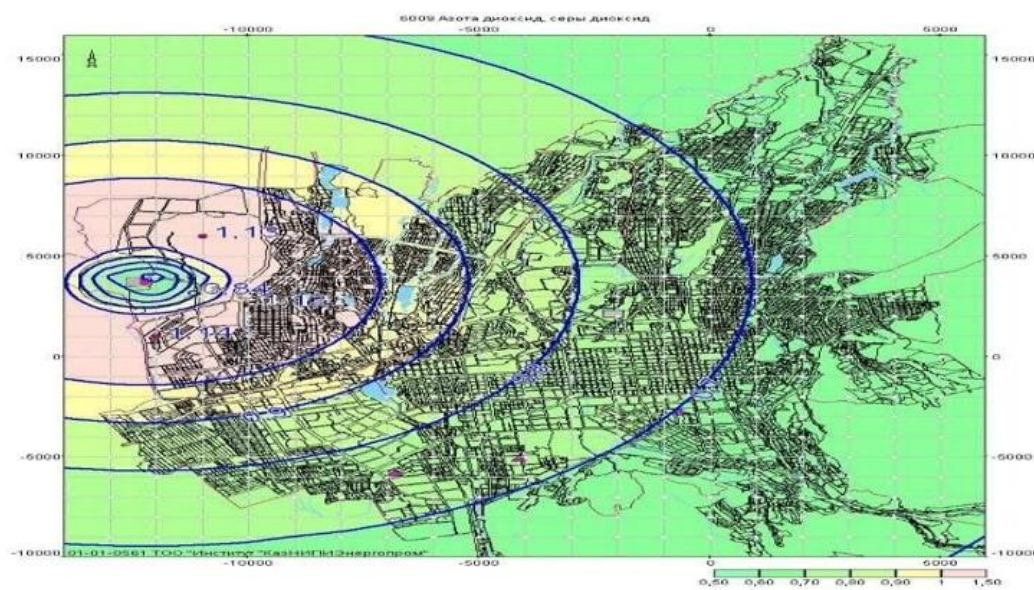


Рисунок 1. - Зона активного загрязнения выбросами ТЭЦ

С целью снижения экологической нагрузки рассмотрены четыре варианта модернизации ТЭЦ для минимизации воздействия ТЭЦ на окружающую среду:

По виду топлива:

- два варианта использования в качестве топлива – природного газа: вариант и вариант 4;
- сохранение существующего вида топлива – экибастузского угля – вариант 2,
- совместное использование экибастузского угля и природного газа – вариант 3.

Для всех рассматриваемых вариантов принимаются одинаковые тепловые нагрузки и одинаковые условия отпуска тепла потребителям. Во всех вариантах предусматривается автоматизированная система контроля за выбросами загрязняющих веществ и парниковых газов.

3 Результаты и обсуждение

Моделирование процесса загрязнения атмосферного воздуха выбросами ТЭЦ по вариантам модернизации выполнено:

- при максимальной нагрузке ТЭЦ (с учетом повышения производительности котлов до 420 т/ч) и неблагоприятных метеоусловиях (условия, способствующие накоплению примесей в атмосферном воздухе);
- при среднегодовой нагрузке ТЭЦ и среднегодовых метеопараметрах.

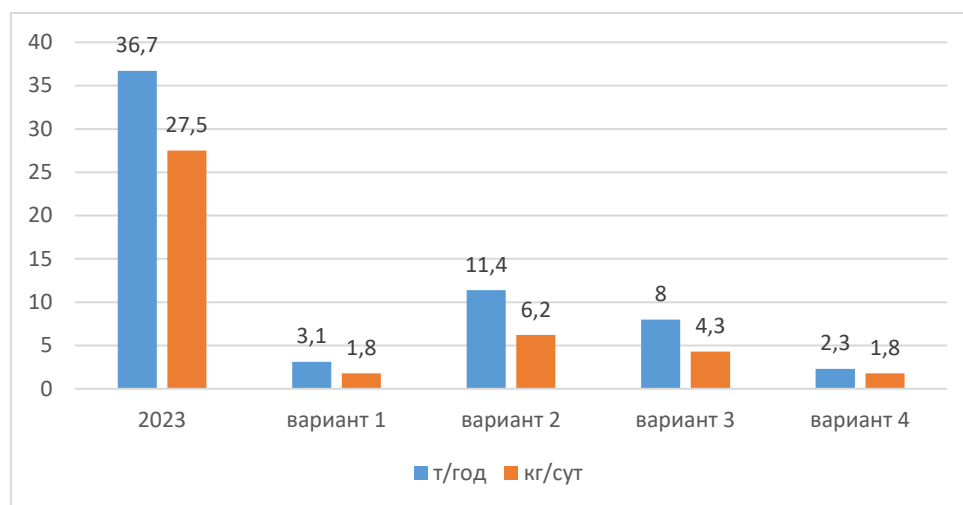


Рисунок 2. - Выбросы загрязняющих веществ по вариантам модернизации ТЭЦ

Моделирование процессов рассеивания загрязняющих веществ показало, что во всех вариантах обеспечиваются нормативы качества атмосферного воздуха.

Уровень загрязнения атмосферного воздуха при среднегодовой нагрузке ТЭЦ по вариантам модернизации также незначителен, как и на существующем уровне.

Выполнена сравнительная оценка вариантов по годовым выбросам, представленная на рисунке 2, здесь же представлена структура выбросов по вариантам [6, с. 42; 7, с. 6].

Представленные данные свидетельствуют о бесспорных преимуществах вариантов 1 и 4 с использованием природного газа. По сравнению с 2020 годом снижение выбросов в этих вариантах составляет порядка $91,5 \div 93,5\%$ и осуществляется за счет исключения выбросов взвешенных частиц и диоксида серы, снижения выбросов диоксида азота.

Однако, при сравнении двух вариантов наиболее рациональным с точки зрения эффективности использования природных ресурсов и снижения техногенной нагрузки на окружающую среду города является вариант 4, позволяющий наиболее эффективно использовать дорогое «чистое» топливо.

4 Выводы

По результатам интегральной оценки на компоненты окружающей среды и социально-экономической среды газовые варианты модернизации ТЭЦ предпочтительны.

Из рассмотренных газовых вариантов модернизации ТЭЦ наиболее целесообразным с точки зрения минимизации влияния на окружающую среду

является вариант 4 с использованием газотурбинных установок, размещаемых в новом главном корпусе. Сравнительное преимущество варианта 4 по сравнению с вариантом 1 можно охарактеризовать следующим образом:

Использование сжигания газа с помощью современных газотурбинных систем, которое соответствует требованиям Европейского сообщества, позволяет сжигать газ исключительно в газотурбинных установках; в варианте 4 эффективность использования топлива составляет примерно 77-79% по сравнению с 67%, отмеченным в варианте 1, что в большей степени соответствует стандартам ЕС по наилучшим доступным технологиям (НДТ), согласно которым целевой показатель непрерывного улучшения выбросов (КИИТ) должен составлять от 65 до 95%; удельные выбросы на единицу сгоревшего топлива (измеряемые в номинальном выражении) в варианте 4 исключительно минимальны; вероятность успешного внедрения варианта 4 на новом объекте в пределах существующего объекта комбинированного производства тепла и электроэнергии (ТЭЦ) заметно ниже, чем у варианта 1, расположенного в существующем подземном главном здании.

Следовательно, при надежной подаче газа на ТЭЦ вариант 4, предусматривающий использование газа наиболее эффективными технологическими средствами, в частности газовыми турбинами, становится наиболее разумным выбором с точки зрения оптимизации использования природных ресурсов и одновременного снижения технологического воздействия на городскую среду. Выбросы в атмосферу, связанные с предполагаемым строительством новой тепловой электростанции (ТЭС) на газотурбинных установках, минимальны у разных поставщиков, поскольку поставляемые газовые турбины соответствуют нормам Европейского союза.

5 Список использованных источников

1. Приказ Министра Энергетики РК "Об утверждении перечня наилучших доступных технологий" от 28 ноября 2014 года №155. [Текст] (с изменениями от 11.01.2021 г.).

2. Инструкции по организации и проведению экологической оценки, утверждена Приказом Министра экологии, геологии и природных ресурсов Республики Казахстан от 30 июля 2021 года № 280, [Текст].

3. Справочный документ по наилучшим доступным технологиям (НДТ) для крупных топливо сжигающих установок. Директива по промышленным выбросам 2010/75/EU (Комплексное предотвращение и контроль загрязнения) [Текст]. 2010г.

4. Кодекс Республики Казахстан от 25 декабря 2017 года № 120-VI «О налогах и других обязательных платежах в бюджет (Налоговый кодекс)» [Текст], (с изменениями и дополнениями по состоянию на 26.02.2021 г.).

5. Перечень загрязняющих веществ, эмиссии которых подлежат экологическому нормированию. Приказ Министра экологии, геологии и природных ресурсов Республики Казахстан от 25 июня 2021 года № 212, [Текст].

6. Методика расчета концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе от выбросов предприятий (приложение № 12 к приказу Министра окружающей среды и водных ресурсов Республики Казахстан от 12 июня 2014 года № 221, [Текст].

7. Экологический кодекс РК, 2007 г. (с изменениями и дополнениями по состоянию на 02.01.2021 г.), [Текст].

8. Marriott, J., Matthews, H.S., Hendrickson, C.T. Impact of Power Generation Mix on Life Cycle Assessment and Carbon Footprint Greenhouse Gas Results. *J. Ind. Ecol.*, [Текст]. – 2010, 14, 919–928.

9. Калверт, С. и др. «Защита атмосферы от промышленных загрязнений». – М.: Металлургия [Текст]. – Том. 1, стр. 760, том. 2, стр. 71, 1988.

10. Рихтер, Л. А., Волков, Э. П., Покровский, В. Н. «Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов тепловых электростанций», [Текст]. – М., стр 291, 1981

11. Закон РК "О техническом регулировании" от 09.11.2004г № 603 –II с изм. на 31 декабря 2006г.

ӘОЖ: 504.062.2; 631.9

ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ СУ РЕСУРСТАРЫНЫҢ ЖАҒДАЙЫНА ӘСЕР ЕТЕТІН АНТРОПОГЕНДІК ЖӘНЕ ТАБИҒИ ФАКТОРЛАРДЫ ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ БАҒАЛАУ

Баедилов Қ.Е., Санатова Т.С., Айтбаева Ж.М.

k.baiedilov@mail.ru

Қазақстан Республикасының су ресурстарының экологиялық жағдайын зерделеу және су экожүйесін тұрақты басқару үшін антропогендік факторларды азайту бойынша ұсыныстар әзірлеу. Республикада су тапшылығын жоюдың екі жолы ұсынылады: су ресурстарына жүктемені азайту және тұщы су ресурстарын ұлғайту, сондай-ақ қазіргі заманғы сымсыз АТ - технологияларды пайдалана отырып, су объектілерін мониторингілеудің автоматтандырылған жүйелеріне негізделген заманауи болжау әдістерін енгізу, болжамды орындау мерзімін және дәлдігін арттыруды қамтамасыз ету, сондай-ақ су объектілерінің жай-күйі туралы деректер мен мониторинг жүйесін құруға мүмкіндік береді [1].

Су – экожүйелік функцияларды ғана емес, сонымен қатар жер бетінде тіршілік ететін барлық организмдердің, соның ішінде адамдардың тіршілігін қамтамасыз ететін ең маңызды табиғи ресурс. Осыған байланысты су ресурстарын басқару проблемалары, әсіресе климаттың өзгеруі және антропогендік жүктеменің артуы жағдайында көптеген елдер, соның ішінде Қазақстан Республикасы үшін өзекті болып отыр [2].

Бұл зерттеудің мақсаты Қазақстандағы су ресурстарының экологиялық жағдайын зерттеу және су экожүйелерінің жағдайын жақсартуға және оларды тұрақты басқаруды қамтамасыз етуге бағытталған антропогендік факторларды төмендету бойынша ғылыми негізделген ұсыныстар әзірлеу болып табылады [3,4,5].

Бұл мақсатқа жету үшін: су ресурстарының қазіргі жағдайына кешенді баға беру, антропогендік факторлардың әсерін зерттеу және елдің экономикалық және әлеуметтік шындығын ескере отырып, оларды сақтау мен қалпына келтіруге бағытталған шараларды ұсыну қажет. Зерттеу нәтижелері бойынша ұсыныстарды жүзеге асыру су ресурстарын тұрақты пайдалануға, су объектілерінің сапасын жақсартуға, экожүйелерді қалпына келтіруге және су ресурстарына тәуелді халықтың өмірін жақсартуға ықпал етеді.

Қазақстан Республикасында айтарлықтай су ресурстары бар, бірақ бұл ресурстар антропогендік әсерге байланысты бірқатар экологиялық проблемаларға тап болады. Оларға судың ластануы, су қорының сарқылуы, өзен-көлдердің гидрологиялық режимінің өзгеруі, климаттың өзгеруінің су ресурстарына әсері жатады. Сонымен қатар, суды ауылшаруашылық және өнеркәсіптік қарқынды пайдалану, халық санының өсуі және экономикалық белсенділіктің өзгеруі су экожүйелеріне қысымның күшеюін тудырады, су ресурстарының сапасының нашарлауына және кейбір жағдайларда олардың жоғалуына әкеледі. Қазақстан Республикасының су ресурстарының негізгі экологиялық проблемаларының тізімі: су деңгейінің төмендеуі, жер үсті суларының ластануы, трансшекаралық су қақтығыстары, экожүйенің деградациясы, Арал апаты, ауыз судың жетіспеушілігі, қалалық судың жоғалуы, климаттың өзгеруі.

2025 жылдың басынан бері Қазақстанда жер үсті суларының сапасының нашарлауы ресми түрде тіркелді. Қазгидрометтің мәліметінше, қаңтар-наурыз айларында елімізде таза өзен жоқ. Өткен жылдың қорытындысы бойынша Түркістан облысындағы Бадам мен Ақсу, Павлодардағы Ертістің бір саласы Усолка 1-сыныпқа жататын болса да, ең жақсы сапа болып шықты. 1-суретте Қарағанды және Түркістан облыстарындағы өзендердің жағдайы көрсетілген.



а) Шерубай - Нұра өзені,
Қарағанды облысы



б) Келес өзені Түркістан облысы

1 сурет - Өзендердің күйінің суреті

Су объектілерінің ластануы бірнеше бағытта жүреді: ауыр металдар, тұздар, органикалық заттар (1-кесте):

Кесте 1 - Ластаушы заттардың топтары

№	Ластану тобы	Ластаушы заттар
1	Ауыр металдар	Мырыш, марганец, никель
2	Тұздар	Хлоридтер, сульфаттар, магний
3	Органикалық заттар	Аммоний ионы, КО (химиялық оттегіге сұраныс), минералдану иондары және құрғақ қалдық

Су ресурстары жай-күйінің нашарлауының себептері: су ресурстарын тиімсіз басқару, сумен жабдықтау және канализацияның ескірген технологияларын пайдалану, су объектілерінің экологиялық жағдайына жүйелі мониторинг пен талдаудың болмауы, оның ішінде Қазақстан өзендерінің су тұтынуы мен зиянды заттардың құрамын есепке алудың автоматтандырылған бақылау жүйелерінің толық болмауы.

Су экожүйелерін қалпына келтіру мәселелеріне жеткіліксіз көңіл бөлу, сондай-ақ антропогендік факторларды барынша азайтуға және су ресурстарын тұрақты басқаруды қамтамасыз етуге бағытталған кешенді ұсыныстардың болмауы маңызды аспект болып табылады.

Жер үсті суларының жоғары ластануының негізгі себептері:

- тау-кен өнеркәсібінің еліміздің су қоймаларына шығарылатын лас қалдықтарының үлкен көлемі;
- өнеркәсіптік металлургиялық кәсіпорындардың ағынды суларын ағызу;
- алты валентті хромды шығаратын хром қосылыстары зауыттарынан өндірістік қалдықтарды шығару;
- қалалар мен елді мекендердің тұрмыстық сарқынды сулары.

Елек өзенінің жер асты және жер үсті суларының бормен ластану мәселесі химия зауыты іске қосылғаннан бері 60 жылдан астам уақыттан бері тұрғындарды алаңдатып келеді. Қазіргі уақытта бұл аймақта бормен ластанған жер асты суларының таралу ауданы 21 шаршы шақырымнан асады.

Ерекше назар аударылатын аумаққа трансшекаралық өзендер, атап айтқанда, Шығыс Қазақстан облысының аумағы арқылы өтетін Ертіс, еліміздің негізгі су жолы, сулары 4-класқа жатады және Ертістен терең тазартылғаннан кейін ғана сусын алуға болады. Бұл су жолына негізгі қауіп өнеркәсіптік қызмет аймағында орналасқан ағындар болып табылады.

Мысалы, Өскеменнен Предгорный кентіне дейінгі учаскедегі Ертістің жер үсті сулары орташа ластанған деп сипатталады. Бірақ қазірдің өзінде ауыл ішіндегі учаскеде судың ластану көрсеткіші (ПИ) 3-ке дейін артып отыр. Бұл Ертіс саласы – Краснояр өзенінен келетін зиянды қоспалардың нәтижесі. Бұл су арнасы Жоғарғы Ертіс бассейніндегі ең ластанған су болып табылады. Оның суының сапасы 7 классқа жатады (өте лас).

Экономика салаларында қазіргі заманғы су үнемдеу технологияларын кеңінен қолданумен ұштастыра отырып, өзен ағынын бассейнаралық және трансшекаралық тасымалдау Қазақстан Республикасында су қауіпсіздігін қамтамасыз етудің нақты негізі бола алатыны анықталды.

Республикада су тапшылығын жоюдың екі жолы ұсынылады: су ресурстарына жүктемені азайту және тұщы су ресурстарын көбейту. Бірінші жол суды көп қажет ететін өндірістердің даму қарқынын төмендету және өнеркәсіпте, ауыл шаруашылығында және коммуналдық шаруашылықта заманауи су үнемдеу технологияларын енгізу бойынша шаралар кешенін жүзеге асыруды көздейді. Екіншісі – мемлекетаралық су қатынастарын жақсарту, өзен ағынын реттеу, жер асты тұщы су қорларын пайдалану, тұзды және тұзды суларды тұщыту, жауын-шашын мөлшерін жасанды түрде арттыру, су ресурстарын аумақтық қайта бөлу арқылы тұщы су ресурстарын көбейту.

Қазіргі уақытта су объектілерінің ластануы өзекті мәселе болып табылады. Алматы су айдындарына қалдықтарды төгу арқылы табиғи су режимі бұзылуда. Өзен суының құбыр ағындарымен, тұрмыстық қалдықтармен, өндірістік қалдықтармен ластану үлесі де жоғары. Мәселен, Алматы қаласын сумен қамтамасыз ететін негізгі өзендердің суының ластануын зерттеу өзекті мәселе. Қала арқылы Үлкен Алматы және Кіші Алматы өзендері, сондай-ақ олардың салалары Есентай (Весновка), Аққайың, Ремезовка, Жарбұлақ (Казачка), Қарасу, Қарғалы (Қарғалы) ағып өтеді. Есентай өзені Үлкен Алматыға құяды, одан кейін Қаскелеңге, Кіші Алматы өзені Қапшағай су қоймасына құяды.

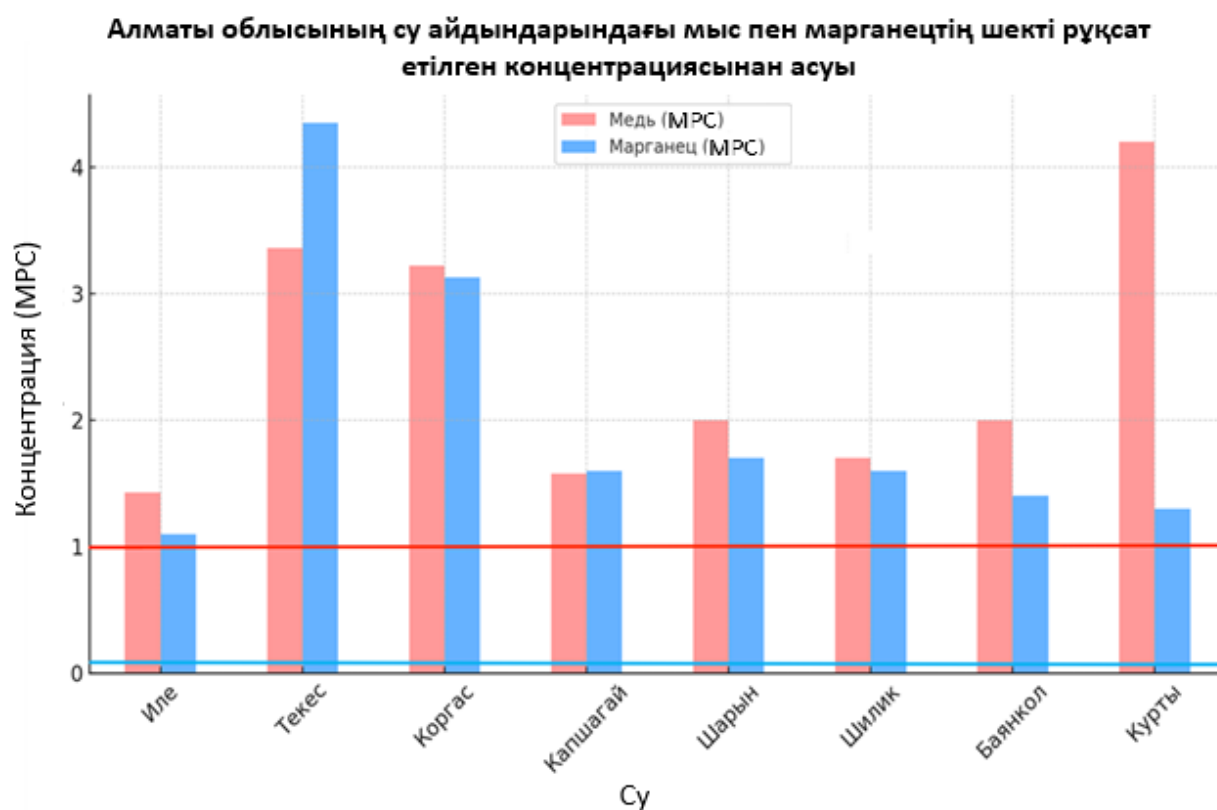
Зерттеудің ақпараттық базасы Алматы қаласы мен облыс өзендерінің жер үсті суларының мониторингі саласындағы ғылыми-статистикалық құжаттама болды. Алматы қаласының өзендерінде ауыр металдардың (Cd, Pb, Cu, Zn) болуы көрсетіліп, олардың динамикасы мен 2019-2023 жылдар аралығында жинақталу дәрежесі зерттелді. Алматы өзендерінің мыс ластануы айтарлықтай болды: барлық 3 өзенде және барлық талданған жылдары 11-ден 12 ШРК-ға дейін. Pb ластануы Кіші Алматы өзенінде (1,1 ШРК) және Үлкен Алматы өзенінде (1,9 ШРК) байқалды. Басқа ауыр металдардың мөлшері ШРК-дан төмен болды (2 кесте).

Кесте 2 - Алматы облысы өзендерінің ластануының физика-химиялық көрсеткіштері

Су	T (°C)	pH	ВРК5, мг/ дм ³	Cu (МРС)	Mn (МРС)	Fe (МРС)	NO ₂ (МРС)	SO ₄ (МРС)
Пе	5.1	7.8	1.1	1.43	1.1	-	-	-
Текес	5.5	7.7	1.7	3.36	4.35	1.4	-	-
Қорғас	5.3	7.7	10.5	3.22	3.13	1.2	-	-
Қапшағай	6.3	7.7	1.2	1.58	1.6	1.1	-	-
Шарын	6.0	7.6	1.05	2.0	1.7	-	-	-
Шилік	6.1	7.6	0,75	1.7	1.6	-	-	-
Баянкөл	5.4	7.6	1.2	2.0	1.4	-	-	-

Құртас	6.1	7.6	1.25	4.2	-	-	1.3	2.1
Бартоғай	6.1	7.6	0,81	-	-	-	-	-
Есік	6.0	7.6	0,78	-	-	-	-	-
Қаскелең	5.8	7.6	1.15	2.0	1.8	1.1	-	-
Қарқара	5.5	7.6	1.11	1.8	1.5	-	-	-
Түрген	6.3	7.6	1.12	1.6	1.4	1.1	-	-
Талғар	5.9	7.6	1.13	2.1	1.4	-	-	-
Темірлік	6.0	7.6	1.5	2.0	1.3	-	-	-
Кіші Алматы	4.6	7.8	1.5	1.77	2.3	1.1	1.51	-
Үлкен Алматы	4.8	7.8	1.2	1.27	1.58	1.1	-	-
Есентай	4.7	7.8	1.4	1.5	1.35	-	1.9	-

Алматы облысының су айдындарындағы мыс пен марганец мөлшері 2 суретте көрсетілген.



2-сурет. - Алматы облысының су айдындарындағы мыс пен марганец мөлшері.

Алматы облысындағы су объектілерінің мониторингі көрсеткендей, негізінен мыс пен марганец бойынша шекті рұқсат етілген концентрациядан асып кеткен [6].

Су ресурстары және ирригация министрлігі судың ластануы мәселелерінің шешімін тазарту құрылыстарын жаңғыртудан, ашық мониторинг пен ағызындыларды қатаң бақылаудан көреді. Қазақстанда қатаң талаптарды көздейтін жаңа Су кодексі қабылданды. Заңнамаға алғаш рет «Су қауіпсіздігі» түсінігі енгізілді.

Жоғары сапалы тұщы суды сақтау үшін ауыр металдарды, пестицидтерді, нитраттарды және экожүйелерде жиналуы мүмкін басқа ықтимал зиянды заттарды үнемі өлшеп отыру маңызды. Негізгі учаскелерде тазарту және сүзу технологияларын енгізу, сондай-ақ қоршаған ортаны қорғау ережелерін қатаң сақтау ластану деңгейін төмендетуі мүмкін.

Су объектілерін пайдалану мен қорғау, су объектілеріндегі судың сапасына және олардың жай-күйіне әсер ететін келеңсіз процестердің дамуын уақтылы анықтау мен болжауда, осы процестердің жағымсыз салдарларының алдын алу бойынша шараларды әзірлеу мен іске асыруды қамтамасыз етуде, сондай-ақ су объектілерін қорғау жөніндегі шаралардың тиімділігін бағалауда аса маңызды рөл мемлекеттік мониторинг - су объектілеріндегі өзгерістердің жай-күйін бақылау, бағалау және болжау жүйесіне беріледі. Посттар мен бақылау бағдарламаларының санын қысқарту, ескірген әдістер мен технологияларды қолдануға негізделген болжамдардың әдістемелік базасын пайдалану гидрологиялық болжамдар сапасының тұрақты нашарлау үрдісін анықтады. Жер үсті суларының ластануын режимдік бақылаулар желісінің жай-күйі сондай-ақ гидрохимиялық бақылау пункттерінің, алынған су және түп шөгінділерінің сынамаларының, жүргізілген талдау жұмыстарының санының азаюымен сипатталады [7]. Судың режимі мен сапасын бақылаудың автоматтандырылған және қашықтағы әдістерінің жоқтығы және заманауи аналитикалық зертханалық жабдықтармен нашар жабдықталуы бақылаулар сапасының төмендігін алдын ала анықтайды. Су объектілерінің мемлекеттік мониторингін жүргізудің негізгі мәселелерінің бірі нәтижелер туралы ақпараттың шектелуі болып табылады. Су объектілерінің мемлекеттік мониторингі жүйесінің міндеттері мемлекеттік бақылау желісінің оңтайлы құрамын қалыптастыру, оның техникалық жарақталуын жетілдіру, болжаудың қазіргі әдістерін енгізу, сондай-ақ су объектілерінің қазіргі сымсыз АТ технологияларын пайдалана отырып, сымсыз сенсорлық желі WSN технологияларын пайдалана отырып, су объектілерін бақылаудың автоматтандырылған жүйелері (БАЖ) негізінде заманауи болжау әдістерін енгізу болып табылады [8].

Су объектілерінің БАЖ дамуы келесі экологиялық мәселелерді шешуге мүмкіндік береді:

- 1) БАЖ деректерін Экология департаментінің және кәсіпорынның компьютеріне онлайн режимінде жіберуге болады;
- 2) БАЖ деректері қағаз жеткізгіште Экология департаментіне ұсыну үшін кәсіпорынның өндірістік экологиялық бақылау есептері түрінде ресімделеді;
- 3) Су объектілерінде орнатылған БАЖ нәтижелері су объектілеріндегі зиянды заттардың бар шоғырлануын талдауға мүмкіндік береді.

БАЖ енгізу болжамдардың орындалу мерзімін және дәлдігін арттыруды, сондай-ақ су объектілерінің мемлекеттік мониторингі деректерін жүйелеуге және біріктіруге, олардың мемлекеттік органдарға, су объектілерінің мемлекеттік мониторингіне қатысушыларға, ғылыми ұйымдарға және азаматтарға қолжетімділігін қамтамасыз етуге мүмкіндік беретін ақпараттық жүйені құруды қамтамасыз етеді.

Әдебиеттер тізімі

1. Қазақстан Республикасы Парламентінің Сенаты. Сенат кеңсесі. Ақпараттық-талдау бөлімі. «Қазақстандағы су қауіпсіздігі: жағдайы, проблемалары және ұсыныстары» тақырыбындағы парламенттік тыңдауларға ақпараттық-сараптамалық шолу. - Нұр-Сұлтан, 2019. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=33670190. Қолданылған күні 22.02.2020.
2. Жер үсті және теңіз гидрохимиялық көрсеткіштерінің сапасын ресми түрде кешенді бағалау бойынша әдістемелік ұсыныстар. Гидрометеорология жөніндегі мемлекеттік комитет . – М.: 1988. – 10 б.
3. Қазақстан Республикасының 2022 жылға арналған қоршаған ортаның жағдайы және табиғи ресурстарды пайдалану туралы ұлттық баяндама.
4. Қазақстан Республикасының 2023 жылға арналған қоршаған ортаның жағдайы және табиғи ресурстарды пайдалану туралы ұлттық баяндамасы.
5. Қазақстан Республикасының 2024 жылға арналған қоршаған ортаның жағдайы және табиғи ресурстарды пайдалану туралы ұлттық баяндамасы.
6. Сұлтанғазиева Г., Алматы қаласының су ресурстарының химиялық ластану деңгейін зерттеу. Химия академиялық ғылыми журналы, (1), 54–69 . <https://doi.org/10.32014/2024.2518-1491.207/>
7. Шевцов М.Н., Мачинов А.Н., Панкратов Б.П., Лопатук В.А., Дудник В.А. Прихотьедегі алтын кен орындарын игеру аймақтарындағы су ресурстарының жай-күйін экологиялық қадағалау // «Су: экология және технология» Үшінші халықаралық конгресі/ECWATECH-98, тезистер. Мәскеу, 1998. б . 373-374.
8. Беспалова К.В., Селезнева А.В., Селезнев В.А. Су объектілеріне ластаушы заттардың шығарылуын олардың табиғи ерекшеліктерін ескере отырып реттеу // Алтыншы халықаралық экологиялық конгресс жұмыстары жинағы (сегізінші халықаралық ғылыми-техникалық конференция) «Экология және өнеркәсіптік-көлік кешендерінің өмірінің қауіпсіздігі ELPIT 2017», т.6. – Самара, 2017. – С.16-25 (RSCI).

УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ НА ГЭС С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ АВАРИЙ

Демеуов Б.М., *Жандаулетова Ф.Р.

НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека
Даукеева», Казакстан, г. Алматы

* f.zhandauletova@aes.kz

Аннотация: Развитие малой энергетики для Жетысуской области – приоритетное направление. каскада ГЭС на реке Усек планируется осуществить на территории Панфиловского района Талдыкорганского региона Алматинской области Республики Казахстан.

В процессе эксплуатации гидротехнических сооружений встает вопрос о надежности эксплуатации сооружений, поэтому управление водными ресурсами на ГЭС с целью снижения аварий является актуальной в свете глобальных экологических и экономических вызовов. В последние годы наблюдается увеличение интереса к технологиям, минимизирующим воздействие на окружающую среду, особенно в энергетическом секторе. Гидроэлектростанции (ГЭС) обладают значительным потенциалом для экологически чистой выработки энергии, однако их эксплуатация сопряжена с рядом рисков, таких как загрязнение водных ресурсов, воздействие на экосистемы, а также вероятность аварийных ситуаций, которые могут привести к серьезным последствиям.

Аварийные ситуации на ГЭС могут возникать по ряду причин: из-за устаревшего оборудования, неправильного управления водными потоками, а также климатических изменений, влияющих на водный режим. Внедрение зеленых технологий позволяет сократить воздействие на окружающую среду, а также повысить безопасность и устойчивость ГЭС. К таким технологиям можно отнести системы мониторинга водных потоков, использование экологических методов очистки сточных вод и меры по предотвращению загрязнений.

Кроме того, с учетом повышения частоты экстремальных погодных явлений, обусловленных изменением климата, становится важным адаптировать существующие системы управления водными ресурсами на ГЭС к новым условиям и новые технологии позволяют не только снизить аварийные риски, но и поддерживать устойчивость водных экосистем, что особенно важно для регионов с ограниченными водными ресурсами.

Ключевые слова: водные ресурсы, водопользование, гидроэлектростанции, экологические проблемы, аварии и катастрофы, безопасность и надёжность эксплуатации ГЭС.

Введение. Гидроэлектростанции (ГЭС) являются высокоэффективными источниками электроэнергии и в большинстве случаев проектируются и строятся

в виде объектов комплексного назначения, обеспечивающих нужды не только электроэнергетики, но и других отраслей народного хозяйства: мелиорации, водного транспорта, водоснабжения, рыбного хозяйства и др. Их параметры, компоновки, типы сооружений и оборудования в значительной степени обусловлены топографическими, геологическими, гидрогеологическими и другими природными условиями местности. [1, 2].

При этом примерно до 70-х годов текущего столетия полагалось, что знаний и опыта ученых, разработчиков и конструкторов достаточно для того, чтобы разрабатывать такие системы высоконадежными; опыта инженеров, рабочих и строителей - чтобы качественно воплощать такие системы в металле и бетоне; опыта и знаний технологов и специалистов-эксплуатационников - чтобы обеспечивать бесперебойную и безаварийную работу таких систем.

Основанная на тех же мотивах уверенность в надежной работе систем контроля, управления и безопасности, приводила к тому, что инциденты, аварии и катастрофы, могущие возникнуть при эксплуатации объектов, включающих в себя такие системы, рассматривались как события, реализация которых практически невозможна. Если, тем не менее, чрезвычайная ситуация возникала, предпринимались все необходимые меры для ликвидации такой ситуации и ее последствий. Оценить эффективность предпринятых мер можно было только после очередной аварии на данном объекте или ему подобном.

Не приходилось говорить и об оптимальности распределения ресурсов для обеспечения безопасной работы: вкладывалось столько средств, сколько считалось необходимым для достижения абсолютно безопасной работы объекта, при этом одинаково высокие вложения могли делаться как для поддержания режима безопасной работы объектов, реально показывающих высокую степень аварийности, так и объектов, на которых чрезвычайные ситуации случались крайне редко.

Цель: исследование и диагностика данных натурных и визуальных наблюдений процессов строительства каскада из четырех ГЭС на реке Усек является создание маневренного источника электроэнергии для поставки в дефицитную энергосистему Алматинской области (Южная зона РК) электрической мощности и энергии, а также осуществление контроля по выявлению нарушений и пути их решения.

Теория

Развитие современной гидроэнергетики невозможно без совершенствования средств, обеспечивающих мониторинг текущего состояния оборудования в целях обеспечения надежности и определения оптимальных режимов его работы. Одной из важнейших задач при эксплуатации гидроэлектростанций является рациональное использование гидроресурсов. Одним из способов повышения эффективности использования ресурсов и, следовательно, работы станции, является определение рационального состава гидроагрегатов при оптимальном распределении нагрузки между ними.

Гидроэнергетика является возобновляемым источником электроэнергии и увеличение доли выработки чистой энергии становится особенно актуально в последнее время, когда возможно развитие программ субсидирования зеленой энергетики, штрафов и дополнительного налогообложения за грязную энергию.

К 2050 г. суммарная мощность ГЭС в мире может достигнуть 2050 ГВт, что на 54% больше уровня 2020 г., а выработка электроэнергии за тот же период вырастет на 57%, а такие энергетические компании как IRENA и МИРЭС также будут увеличивать гидроэнергетические мощности к 2030 – 2050 гг. [3, 4].

Прогноз установленной мощности и выработки ГЭС в мире до 2050г., ГВт, млрд кВт-ч показан на рисунке 3.

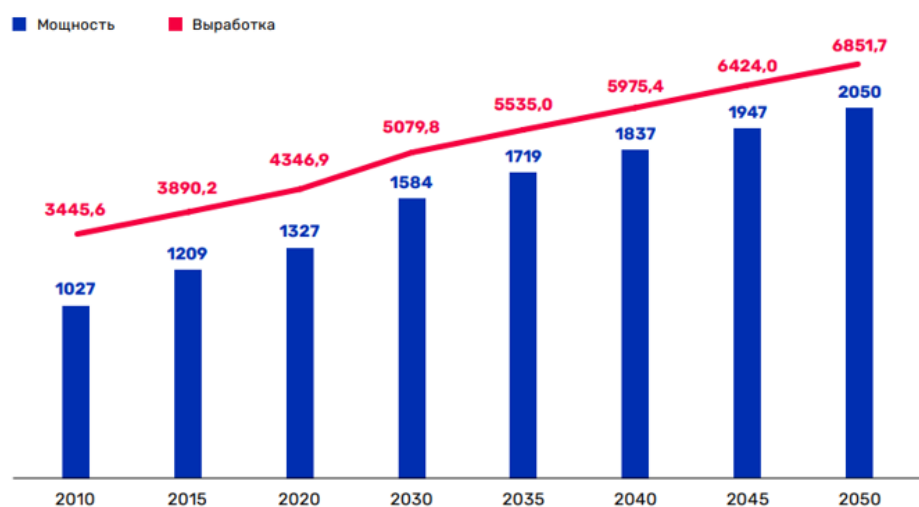


Рисунок 3 – Прогноз установленной мощности и выработки ГЭС в мире до 2050г., ГВт, млрд кВт-ч

Анализируя существующие состояния гидротехнических (ГТС) сооружений мы видим, что все они построены более 50 лет назад и достаточно являются изношенными.

Известно, что в Республике Казахстан (РК) насчитываются ГТС в количестве 13 366, в республиканской собственности находятся – 6 501; в коммунальной – 6 305; в частной – 529; бесхозные - 31. Из которых числится количество: водохранилищ – 405, пруды – 271, гидроузлы – 118, плотины – 461, дамбы – 247, каналы – 8 577, другие водохозяйственные сооружения – 3 287, причем на 01.01.2024 года обследованы 1362 ГТС, требующие ремонта – 537. Они отработали нормативный срок службы и достигли высокой степени износа и требуют финансирования работ по их содержанию в надлежащем состоянии [5].

Методы исследования

В работе были использованы следующие методы исследования: методы теоретического уровня, включающие анализ данных контрольно-измерительной аппаратуры, методика оценки безопасности гидротехнических сооружений, а

также результатов проведенных обследований, обобщение, сравнение и систематизацию теоретических данных.

Кроме этого, методы эмпирического уровня, в частности, моделирование поперечников грунтовой плотины, обследование участка с применением геофизических методов, а также построение графиков и анализ полученных результатов.

Особо важное значение уделяется диагностике и работе фильтрационной прочности основания грунтовых плотин, поскольку нарушения в них оказывают значительное влияние на устойчивость ГЭС и могут причиной аварий на них, что составляет 28 -31%. [6-8].

Для обеспечения безопасной эксплуатации сооружений на ГЭС имеется Декларация безопасности, где указываются соответствия критериям безопасности, определяется степень риска возникновения аварийных ситуаций, класс объекта и меры по обеспечению в целом безопасности гидроэлектростанции [9-10].

Научные результаты

Нами были проанализированы результаты натурных и визуальных наблюдений плотины и произведены их сравнение с критериями безопасности, в состав которой входили: анализ данных натурных и визуальных наблюдений с критериальными значениями; проведен комплексный анализ фильтрационных процессов; проведены специальные инструментальные обследования.

Целью строительства каскада из четырех ГЭС на реке Усек является создание маневренного источника электроэнергии для поставки в дефицитную энергосистему Алматинской области (Южная зона РК) электрической мощности и энергии.

Задачами предварительного технико-экономического обоснования являются: оценка площадки строительства, включая природные условия, транспортные связи и подъезды; изучение возможных вариантов компоновки сооружений ГЭС; оценка стоимости строительства рекомендуемого варианта; оценка энергетических и технических параметров ГЭС; определение технико-финансовых показателей.

Каскад из четырех малых гидроэлектростанций с общей установленной мощностью 33 МВт и объемом вырабатываемой электроэнергии 150,0 ГВтч предназначен для покрытия объектов Алматинского региона Алматинской области РК. Каждая ГЭС каскада имеет мощность от 7 до 9 МВт и относится в Казахстане к энергопроизводящим организациям, работающим на возобновляемом источнике энергии. Кроме этого, предложены рекомендации по дальнейшему проведению диагностики фильтрационных процессов грунтовой плотины с целью обеспечения её дальнейшей безопасной эксплуатации. Каскад состоит из четырех малых ГЭС.

ГЭС - 1 – плотинно-деривационного типа, она расположена в голове каскада. В ее состав входят: водозаборный головной узел, включающий земляную плотину, водоспуск, водоприемник и автоматический водослив (рисунок 1).

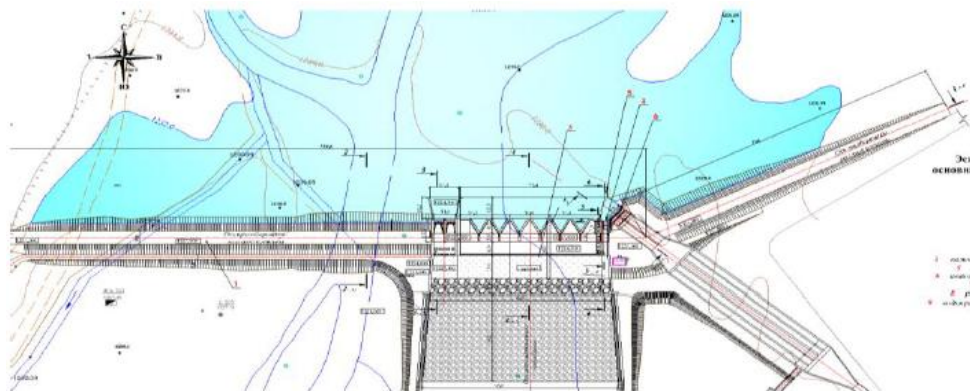


Рисунок 1 - Водозаборный узел ГЭС

В концевой части водопроводного тракта ГЭС находится станционный узел в состав, который входят напорный бассейн, здание ГЭС с четырьмя гидроагрегатами горизонтального исполнения, отводящий канал и сооружения выдачи мощности (рисунок 2).

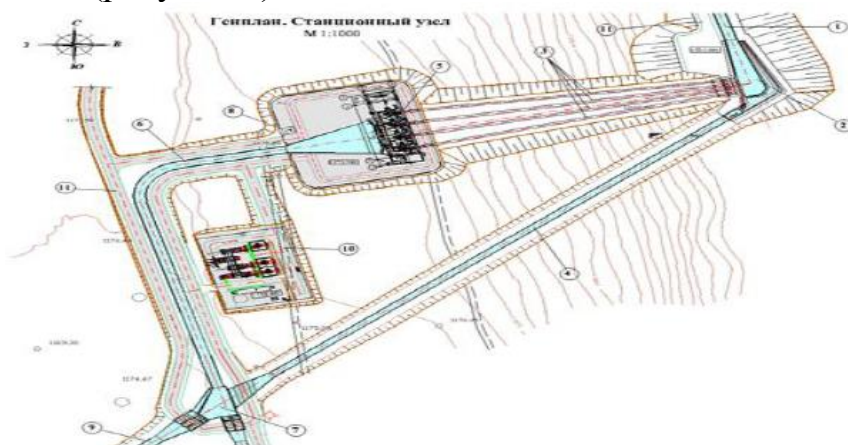


Рисунок 2 - Станционный узел ГЭС

Напорный бассейн рассчитан и расход $Q_{расч} = 6 \text{ м}^3/\text{с}$, так как общий расход воды $18 \text{ м}^3/\text{с}$, то количество камер напорного бассейна будет $n=3$. Для зимнего пропуска расхода предусмотрим четвертую камеру на расход $Q = 4 \text{ м}^3/\text{с}$. Для аварийного сброса воды предусмотрен автоматический водосброс, который состоит из водосливной стенки.

Требуемый расход при $Q = 18 \text{ м}^3/\text{с}$ при $L = 40 \text{ м}$ пропускает. Гидравлический расчет холостого сброса и водобойного колодца был сделан в программе “excel” в табличной форме (таблица 1). Выбираем канал холостого сброса шириной $B = 1,5$ и глубиной $h = 1,5 \text{ м}$.

Таблица 1 - Расчет водобойного колодца

Наименование	Значение	Наименование	Значение	Наименование	Значение
скорость, $\text{м}/\text{с}$, V	10	число Фруда Fr	11,2	вторая сопряженная глубина, м , h_2	4,2

глубина, м, h_1	1	функция $f(Fr)$	20,5	ширина колодца, м, B_2	15,8
коэффициент Кориолиса, a	1,1	длина прыжка, м, L	20,5	tg	0,3

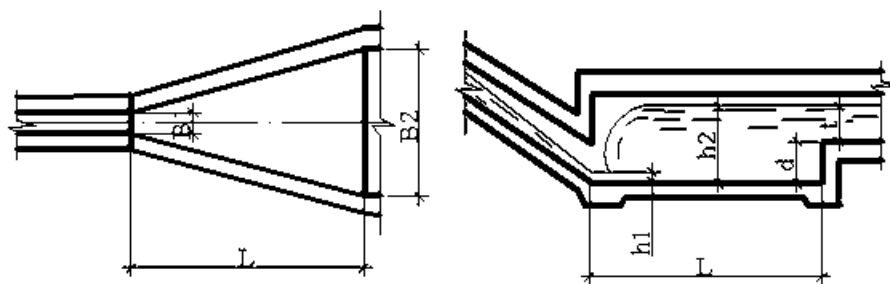


Рисунок 3 - Расчетная схема водобойного колодца

Применение новых подходов позволяет наиболее полно реализовать важнейшие этапы процесса управления: расчет рисков возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера, возможных последствий и мер по их предупреждению на основе методов прогнозирования и методов оценки риска, выработку на этой основе вариантов альтернативных решений, выбор с использованием соответствующих критериев оптимального или наиболее эффективного решения как по ликвидации реально возникшей чрезвычайной ситуации, так и по мерам предупреждения возможных аварийных ситуаций. Это играет огромную роль в условиях ограниченности ресурсов любого государства: материальных, финансовых и людских. Именно эти объекты водной отрасли эксплуатируются десятилетиями, имеют объёмы в десятки тысяч кубометров, аварии на них имеют наиболее тяжелые и катастрофические последствия.

По установленной энергетической характеристике произведен предварительный подбор следующего оборудования для каждой ГЭС каскада.

На ГЭС-1 рекомендовано устанавливать четыре гидроагрегата с высоконапорными турбинами CJA238-W-115/1x9 и гидрогенераторами типа SFW2000-8/1430, поставщики гидросилового оборудования «Sunny Hydro-Power Equipment Corp» - Китай.

Для ГЭС-2 выбраны четыре гидроагрегата с турбинами HLD54-WJ-60 и гидрогенераторами типа SFW800-6/1180. Предлагаемые поставщики оборудования «Hunan Allonward Hydro-Generating Equipment Co., Ltd» - Китай.

На ГЭС-3 выбраны четыре гидроагрегата с турбинами HLD54-WJ-60 и гидрогенераторами типа SFW800-6/1180. Предлагаемые поставщики оборудования «Hunan Allonward Hydro-Generating Equipment Co, Ltd» - Китай.

На ГЭС-4 устанавливаются четыре гидроагрегата с турбинами HL90/D54-WJ-60 с гидрогенераторами типа SFW1000-6/1180. Предполагаемые поставщики гидросилового оборудования «Sunny Hydro-Power Equipment Corp» - Китай. По типу выбранные для ГЭС-2, ГЭС-3 и ГЭС-4 гидротурбины являются быстроходными радиально-осевыми (Francis), для ГЭС-1 тихоходные радиально-осевыми (Francis). Все агрегаты горизонтального исполнения и предназначены

для привода синхронного генератора трехфазного тока путем передачи вращения ротору генератора через фланцевое соединение ротора турбины с ротором генератора.

Управление турбиной осуществляется с помощью регулятора скорости, маслonaпорной установки, аппаратуры автоматики турбины и МНУ. Подвод воды к спиральной камере от предтурбинного затвора осуществляется входным патрубком. Подвод воды от входного патрубка к направляющему аппарату осуществляется спиральной камерой. Направляющий аппарат является запорным органом гидротурбины. Основным рабочим органом гидротурбины является рабочее колесо; для ГЭС-2, ГЭС-3 и ГЭС-4 диаметр (Д1) рабочего колеса равен 60 см, для ГЭС-1 диаметр РК (Д1) равен 115см. Отвод воды от гидротурбины осуществляется изогнутой отсасывающей трубой. На всех ГЭС каскада устанавливаются дисковые предтурбинные затворы. В комплект каждого агрегата входит арматура автоматики, предназначенная для контроля работы гидротурбинного оборудования.

Динамика освоения мощности проекта зависит от технологии и сроков строительства объекта. Срок строительства ГЭС оценивается предварительно в 2 года, включая подготовительный период.

Практика строительства и ввода в эксплуатацию каскадов ГЭС показывает, что при строительстве каскадов, гидроэлектростанции строятся поточным методом. Одноименные сооружения строятся с небольшим разрывом по времени, а то и параллельно. При этом строительные кадры используются на однотипных работах, что в значительной мере сокращает срок строительства. Карьеры и строительные базы при строительстве каскадов используются более рационально.

Развитие инфраструктуры для строительства и эксплуатации проекта в целом предусматривает строительство подъездной автодороги к площадкам станционных узлов, эксплуатационных автодорог для подъезда к основным сооружениям ГЭС, а также временных автодорог строительного периода.

Постоянная инженерная инфраструктура вновь создаваемого предприятия – электроснабжение ЛЭП. Электроснабжение всех зданий и сооружений ГЭС будет осуществляться электроэнергией, производимой на самой станции, от трансформатора собственных нужд. На период полного останова станции, ее электроснабжение будет обеспечено от энергосистемы по ЛЭП-110. В случае отключения линий для пуска станции «с нуля» служит дизель-генератор. Техводоснабжение будет производиться из подводящего тракта ГЭС, питьевая вода привозная. Согласно СНиП РК 2.02-11-2002, все помещения оборудованы автоматической пожарной сигнализацией и системой оповещения о пожаре подачей звукового сигнала.

Строительные конструкции выполняются из негорючих материалов и обеспечивают требуемый предел огнестойкости. Планировочные решения обеспечивают эвакуацию из всех помещений здания. Пути эвакуации имеют естественное освещение. На кровлю предусмотрена пожарная металлическая лестница.

На каждой ГЭС каскада предусмотрены две системы канализации: производственная и хозяйственно-бытовая. Производственная канализация включает в себя систему опорожнения: турбинных водоводов, спиральных камер и отсасывающих труб (вода экологически чистая и не подлежит очистке). Хозяйственно-бытовая канализация сбрасывается в водонепроницаемый выгреб с последующим вывозом, ассенизационной машиной, в место указанное санитарной эпидемиологической службой.

Теплоснабжение (отопление, горячее водоснабжение) здания ГЭС будет осуществляться от батарей типа ТЭН. Подъездные пути, ближайшая железнодорожная станция Сарыозек расположена в 180 км от площадки.

Подъезд с помощью автотранспорта осуществляется по республиканской автодороге Алматы – Жаркент и Сарыозек - Жаркент далее по существующей автодороге районного значения до Жаркент-Арасан. Непосредственно к станционной площадке будет проложена новая автодорога протяженностью около 20 км. Кроме того, будут проложены и внутренние дороги для обеспечения взаимосвязи между всеми сооружениями каскада ГЭС.

Эксплуатационный поселок, учитывая, что каскад ГЭС расположен на небольшом расстоянии от населенных пунктов, постоянное проживание эксплуатационного персонала ГЭС и членов их семей может быть в ауле Кейтын, Жаркент-Арасан, Коктал-Арасан и г.Жаркент.

Производственная база эксплуатации - основная база будет размещена на предприятиях владельца строительства. На площадке будет предусмотрен небольшой хозяйственный двор с БРУ и арматурным цехом мастерской, гаражом и открытой стоянкой служебного автотранспорта. Карьеры строительных материалов расположены на расстоянии не более трех километров от площадок строительства.

Заключение

Среди различных видов ВИЭ гидроэнергетики, благодаря водохранилищам ГЭС, является одним из наиболее «предсказуемых» источников энергии с точки зрения обеспечения выработки, то есть не подверженных резким колебаниям в течение суток и в зависимости от погоды.

Проведенный анализ современных подходов к функционированию каскада ГЭС за счёт увеличения энергоотдачи в различные периоды года показал преимущество по повышению эффективности и экологической безопасности на ГЭС при формировании природно-технических систем.

Рациональное использование мощности водного бассейна реки усек позволит снизить дефицит мощности и электроэнергии, повышение надежности энергоснабжения и качества электроэнергии у потребителей Алматинской области, что инициирует ускоренное развитие сельскохозяйственного и промышленного производства, позволит повысить занятость местного населения. Проблемы социальной сферы могут улучшаться за счет изменения

уровня доходов населения, что позитивно повлияет на демографическую ситуацию, где прирост населения вызовет положительную динамику области.

Строительство каскада ГЭС на реке усек также окажет положительное влияние на инфраструктуру и развитие депрессивного района. После реализации данного проекта изменятся транспортные развязки региона, строительство подъездных путей позволит открыть новые возможности всей области в целом. Важный транспортный узел предоставит возможность изменить статус региона и позволит извлекать дополнительные экономические преимущества.

Список литературы

1. Об утверждении Регламента о безопасности гидротехнических сооружений Приказ Министра водных ресурсов и ирригации Республики Казахстан от 15 июля 2025 года № 173-НК. Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 17 июля 2025 года № 36459.
2. СН РК 3.04-01-2023. Гидротехнические сооружения
3. Бюллетень МАГАТЭ 42/2/2000 Вена. Австрия (июнь 2000 г.). - 64 с.
4. Гидроэнергетика России и зарубежных стран. УП. Москва: ЦСР, 2022 г. – 92 с.
5. Национальный доклад о состоянии окружающей среды и об использовании природных ресурсов Республики Казахстан за 2023 год.
6. Исследование динамических характеристик микроэнергосистем с мини-ГЭС для создания автоматической системы управления в нормальных и аварийных режимах / А. А. Волошин, Н. Б. Хохлов // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 2. – С. 4.
7. Система вибрационного контроля и диагностики на объектах гидроэнергетики [Текст] / Ракурс ГК // Гидротехника. XXI век. – 2020. – № 2. – С. 16–21.
8. Использование водной энергии. Выбор параметров ГЭС суточного регулирования: учебно-методическое пособие / сост. Е. Ю. Затеева, Н. С. Щербакова. – Саяногорск; Черемушки: Сибирский федеральный университет; Саяно-Шушенский филиал, 2021. – 92 с.
9. A. Egorov, V. Kulikova, D. Petrushin, M. Sadokhina. Research of the composition and structure of the Russian Power system Power Plants. Proceedings of the 2021 IEEE ElConRus 2021, 9396417.
10. Analysis of reliability of Boguchany Damcircuit of power output while taking into account the perspective of Siberian United Energy Systems development / A. S. Svinko, E. Yu. Sizganova, R. A. Petukhov, I. V. Kovalenko // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies, Krasnoyarsk, 04 марта 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 22070. – DOI 10.1088/1742-6596/1515/2/022070.

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF WATER RESOURCES MANAGEMENT IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

Zhandauletova F.R., Abikenova A.A.* , Beysekova T.I., Bekmuratova N.S.
Gumarbek Daukeev Almaty University of Energy and Communications, Almaty,
Kazakhstan

*e-mail: a.abikenova@aes.

Introduction. The significance of this research stems from the urgent ecological challenges associated with water resources, the need for their rational utilization, and the imperative of maintaining environmental safety. Particular emphasis is placed on safeguarding surface water bodies from the effects of chemically hazardous and toxic substances, which have the potential to disturb natural ecosystems. In this context, it is crucial to design and implement a comprehensive framework of organizational and technical measures aimed at reducing the adverse impacts of both human activities and natural factors, as well as optimizing water consumption. This includes adopting recirculation-based water supply technologies and implementing strategies to replenish water reserves.

In Kazakhstan, where there is a pronounced scarcity of water resources coupled with declining water quality across most sources, water availability has become a strategic limitation for both economic growth and social development. The importance of prudent water management and protection is formalized in the “Concept of Environmental Safety of the Republic of Kazakhstan,” which identifies water as a fundamental component of national ecological resilience and public welfare. [1, 2].

Globally, water is recognized as a critical resource for sustainable development. The “Agenda for the 21st Century,” endorsed at the 1992 Rio de Janeiro Summit, emphasizes the escalating shortage of freshwater, the gradual exhaustion of reserves, and the intensifying pollution of water bodies. The document also warns that “without transformative changes in water management practices, the world may confront a severe water crisis in the near future.” A United Nations review prepared for the World Summit in Johannesburg indicates that by 2025 nearly two-thirds of the world’s population will reside in countries facing moderate to severe water stress, primarily due to limited access to high-quality water resources [3-6].

Observations of water bodies across different regions reveal that, over time, natural waters accumulate a variety of pollutants, gradually increasing their concentrations. Consequently, certain areas emerge where water quality fails to meet the sanitary standards established for centralized water supply systems intended for drinking purposes.

Research Approaches. Regarding water availability, Kazakhstan ranks among the lowest within the Commonwealth of Independent States. The country’s total freshwater resources are estimated at 524 km³, with annual river runoff averaging 100.5 km³. Of this amount, only 56.5 km³ is generated within Kazakhstan itself, while the

remaining volume is contributed by neighboring Central Asian nations, the Russian Federation, and China.

From the standpoint of river runoff, Kazakhstan ranks among the countries with the lowest water security worldwide. The distribution of water resources across the national territory is highly uneven, which results in unstable water availability for various regions and economic sectors.

The primary contaminants detected in the surface water bodies of Kazakhstan include biochemical oxygen demand (BOD_5), chemical oxygen demand (COD), mineralization levels, major salt ions (particularly magnesium, chlorides, and sulfates), biogenic and organic compounds (such as phosphates, ammonium ions, total phosphorus, and total iron), heavy metals (including manganese, cadmium, nickel, copper, and zinc), as well as phenols and suspended particulate matter.

Data from the Committee for Environmental Regulation and Control under the Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan indicate that in the first half of 2024, numerous incidents of high and extremely high contamination were recorded, prompting the need for environmental safety interventions. Specifically, during this period, 134 cases of high pollution and 8 cases of extremely high pollution were documented across 20 monitored water bodies.

The water bodies with the most frequent pollution incidents included the Akbulak River in Astana, which recorded 6 instances of extremely high pollution (EHP) and 1 instance of high pollution (HP); the Tobyl River in Kostanay region, with 25 cases of HP and 1 case of EHP; the Nura River in Akmola region, which had 1 case of HP; the Nura River in Karaganda region, registering 22 cases of HP; the Kara-Kengir River in Ulytau region, with 12 cases of HP; the Irtysh River in East Kazakhstan region, where 2 cases of HP were noted; the Oba River in East Kazakhstan region, showing 1 case of HP; the Glubochanka River in East Kazakhstan region, with 2 cases of HP; and the Sergeevskoe Reservoir in North Kazakhstan region, which recorded 1 case of HP.

In terms of water supply to households, Kazakhstan's water utilities delivered a total of 2.4 billion cubic meters of water to the distribution network in 2020, representing a 3.1% increase over the previous year. Notably, only about one-fourth of this volume underwent treatment before distribution. The actual volume provided to consumers amounted to 1.2 billion cubic meters, which is 3.8% higher than in 2019. Out of this total, 573.7 million cubic meters, or 47.6%, reached households directly, showing a 7% rise compared to the previous year.

The highest levels of water supply in 2020 were registered in Almaty at 76.3 million cubic meters (up 5% from 2019), Shymkent at 55.1 million cubic meters (an increase of 11.9%), and Karaganda at 54.2 million cubic meters (up 1.5%). Based on forecasts of Kazakhstan's water balance through 2029, the contribution of water from neighboring countries is anticipated to decline from 51.5 km³ to 46.5 km³.

Study Results and Discussion. At the same time, the country's internal river runoff is projected to reach 99.4 km³, which is slightly below the current value of 102.3 km³ (refer to Table 1). Figure 1 illustrates the volume of water supplied to households across the country in 2020, measured in millions of cubic meters.

The majority of Kazakhstan's water resources are composed of surface waters, with an average total volume of around 101 km³. Of this amount, approximately 56% originates within the country, while the remaining 44% is supplied by transboundary river flows from Russia, Kyrgyzstan, Uzbekistan, and China. To investigate the

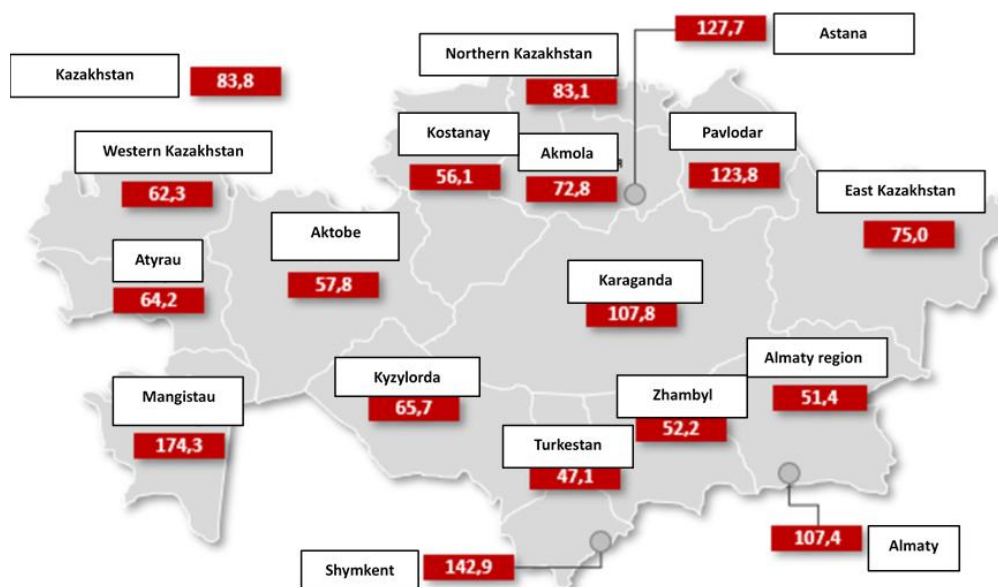


Figure 1 – Population water supply volume in 2020, million cubic meters

Table 1 – Forecasted river flow resources of Kazakhstan considering climate and anthropogenic impacts by 2029, km³

№	Water management basins	Local resources, km ³		Inflow, km ³		Total flow, km ³
		Total	including outflow outside the RK	Total	including those formed on the territory of neighboring countries	Total
1	Aral-Syrdarya	3,17	0,48	14,4	13,9	17,1
2	Balkhash-Alakol	16,6	0,99	12,5	11,5	28,1
3	Ertis	26,6	1,31	7,13	5,82	32,3
4	Yesil	2,47	-	-	-	2,47
5	Zhaiyk-Caspian	3,08	0,97	8,63	7,66	10,7
6	Nura-Sarysu	1,96	-	-	-	1,96
7	Tobyl-Torgay	1,88	-	0,59	0,59	2,47
8	Shu-Talas	1,01	-	3,21	3,21	4,22
Total for the Republic of Kazakhstan		56,7	3,75	46,5	42,7	99,4

presence of pollutants in industrial effluents and the kinetics of sedimentation processes, a series of laboratory experiments were performed. These studies measured the rates at which suspended particles settled in industrial wastewater directed to sludge storage tanks. The tests were conducted in 1000 cm³ cylinders filled with pre-

neutralized effluents. The results illustrating the dynamics of sedimentation in industrial wastewater are shown in Figures 2, 3, and 4.



Figure 2 – Height of the clarified layer 4 hours (1) and 24 hours (2) after sedimentation of industrial wastewater

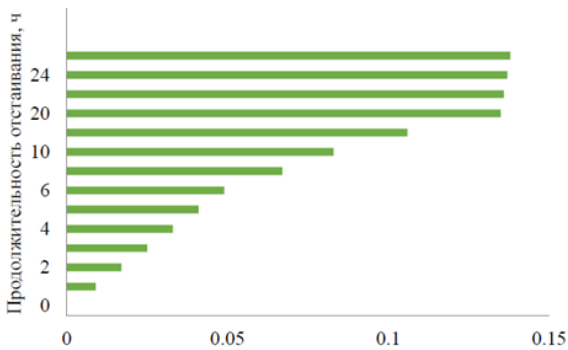


Figure 3 – Sedimentation dynamics of suspended particles in industrial wastewater

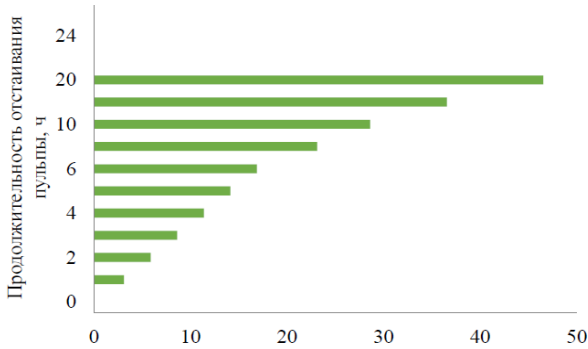


Figure 4 – Clarification effect of industrial wastewater depending on the sedimentation duration

The effectiveness of the sedimentation process is largely influenced by the height of the pulp layer where suspended solids settle. In laboratory studies, sedimentation kinetics were examined using a layer significantly shallower than the depth of full-scale treatment facilities. The findings revealed that clarified industrial effluents possess a high degree of mineralization. In response to this, a method was tested that involves the direct introduction of clarified wastewater from sludge storage tanks into vacuum evaporators. This approach has proven to be an effective technique for treating industrial effluents while minimizing their environmental impact.

Conclusions. To tackle the water resource issues facing the Republic of Kazakhstan, it is recommended to implement a comprehensive set of measures. These include modernizing and expanding water infrastructure, ensuring the rational use of available water resources, enhancing the information and analytical systems for water management, and improving overall ecological conditions. The country's water security fundamentally relies on a combination of inter-basin and transboundary river transfers, alongside the extensive adoption of advanced water-saving technologies across various economic sectors.

References:

1. Programmy upravleniya vodnymi resursami RK na 2020-2030 gody // <https://primeminister.kz>.
2. Ekologicheskij kodeks Respubliki Kazahstan ot 2 yanvarya 2021 goda, № 400-VI ZRK.
3. YWC, 2022. Yarmouk Water Company: Wastewater treatment plants- Jordan. The Yarmouk Water Company, Irbid-Jordan. Available online: <http://www.yw.com.jo/EN/Sewage.aspx> [Accessed August 5 2022].
4. Shaikh, Sameer S.K. and Younus S.K., 2015. Grey Water Reuse: A Sustainable Solution of Water Crisis in Pusad City in Maharashtra. India International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication ISSN: 2321-8169.
5. Yazlyeva G. Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Vestnik nauki» №6 (63) T.1, 2023.
6. Rukovodstvo po raspredeleniyu vodnyh resursov v transgranichnom kontekste. Organizaciya Obedinennyh Nacij, Zheneva, 2022 g. -215 s.

УДК 622. 807.22

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСАЖДЕНИЕ ПЫЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ЗАРЯЖЕННЫМИ КАПЛЯМИ ВОДЫ

Аршидинов М.М., Креслина С.Ю., Болдырева Л. П.

Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева,

г. Алматы, Казахстан

e-mail: m.arshidinov@aes.kz, s.kreslina@aes.kz, l.boldyreva@aes.kz

Современное развитие промышленности, энергетики и транспорта сопровождается значительным ростом антропогенных выбросов, в том числе твёрдых частиц (пыли, золы, сажи, аэрозолей). Загрязнение воздуха мелкодисперсными фракциями (PM_{2.5} и PM₁₀) оказывает неблагоприятное влияние на здоровье человека, вызывая заболевания дыхательных путей, а также негативно отражается на состоянии экосистем и климатических процессов [1, 2].

В связи с этим задача эффективного улавливания твёрдых частиц из газовых потоков остаётся актуальной как для промышленности, так и для систем очистки воздуха в урбанизированных районах.

Традиционные методы пылеулавливания включают механические сепараторы (циклоны), фильтры, мокрые скрубберы и электрофильтры. Несмотря на их широкое распространение, каждый из методов имеет свои ограничения. Циклонные аппараты обладают сниженной эффективностью при работе с мелкодисперсной пылью [3], фильтры требуют регулярной замены и обслуживания [4], а электрофильтры характеризуются значительными энергозатратами и сложной эксплуатацией [5]. В связи с этим перспективным направлением исследований является разработка комбинированных технологий, объединяющих преимущества мокрой и электрической очистки.

Одним из инновационных подходов является использование электрически заряженных капель воды для осаждения частиц пыли. Суть метода заключается в том, что при распылении воды в электрическом поле капли приобретают заряд и становятся активными центрами притяжения для частиц. В результате происходит их укрупнение и осаждение под действием электростатических и гравитационных сил [6]. Подобный механизм эффективен для улавливания субмикронных частиц (PM_{0.1}–PM₁), которые традиционно считаются наиболее сложными для удаления из газовых потоков [7].

Исследования последних лет показывают, что применение электрически заряженных капель воды позволяет достичь эффективности пылеулавливания на уровне 80–95% для частиц размером от 0.3 до 10 мкм [8, 9]. Например, Teng и соавторы продемонстрировали повышение эффективности мокрого электрофильтра (WESP) при введении зоны распыления заряжённых капель [10]. Badami и др. оптимизировали геометрию WESP с использованием численного моделирования и достигли эффективности до 92% при улавливании PM_{2.5} [11]. Xu и коллеги [12] показали, что предварительная зарядка капель существенно увеличивает вероятность столкновения с аэрозолями, позволяя повысить эффективность при меньшем расходе воды.

Теоретическую основу метода составляют исследования процессов взаимодействия аэрозольных частиц с заряжёнными каплями, включая кулоновское притяжение, индукционные эффекты и механизмы коагуляции. Модели облачного осаждения, предложенные Tinsley [13], а также экспериментальные работы Zuo [14] по изучению траекторий одиночных заряженных капель, подтверждают значимость электростатического фактора для повышения эффективности улавливания.

Наряду с лабораторными исследованиями ведутся практические работы по внедрению технологии в промышленные установки. Отчёты EPA [15] указывают на высокую эффективность WESP для улавливания PM₁₀ при одновременном снижении выбросов растворимых газов. Важными вопросами при этом остаются коррозионная стойкость оборудования и оптимизация водопотребления.

Таким образом, анализ литературы показывает, что метод осаждения пыли электрически заряженными каплями воды является перспективным направлением газоочистки. Его преимущества заключаются в повышенной эффективности для мелкодисперсных частиц, возможности совмещения процессов пылеулавливания и газоочистки, а также сравнительно низких энергозатратах. В то же время остаются нерешёнными задачи стандартизации методик оценки эффективности, изучения влияния параметров капель и электрического поля, а также проведения широких промышленных испытаний.

Однако электрозаряженная вода не получила широкого распространения, так как до сих пор не были найдены теоретические или экспериментальные зависимости, связывающие параметры пылевоздушных потоков и завес из электрозаряженных капель. К факторам, характеризующим эти параметры, можно отнести скорость и влажность воздуха, концентрацию и дисперсный состав пыли, турбулентность потока, величину, знак заряда и распределение их на пылинках и каплях, дисперсность капель, структуру факела форсунок и другие. Очевидно, общая картина взаимодействия электрозаряженных капель с пылинками очень сложна.

Цель статьи заключается в исследовании основных механизмов взаимодействия электрически заряженных капель воды с частичками пыли, анализе факторов, влияющих на эффективность процесса осаждения, и разработке рекомендаций по оптимизации параметров установки для достижения максимальной степени очистки воздуха.

Для достижения поставленной цели были проведены лабораторные эксперименты, включающие изучение влияния размеров капель, концентрации заряда, скорости воздушных потоков и температуры окружающей среды на процесс осаждения пыли. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать выводы относительно оптимальных условий применения данного метода и предложить рекомендации по внедрению технологии в промышленных масштабах.

Были проведены исследования по установлению зависимостей между следующими параметрами: скоростью воздушного потока, удельным расходом воды и величиной начальной запыленности. Их значения в опытах изменялись в пределах 0,25 - 2,1 м/сек, 0,011 - 0,042 л/м³ и 4-22 мг/м³ соответственно.

Предварительно теоретическими расчетами было установлено, что оптимальным с точки зрения эффективности осаждения пыли электрозаряженной водой являются капли диаметром около 40 мк. Такие капли в рудничной атмосфере сравнительно долго не испаряются и не уносятся из зоны действия водяных завес.

В экспериментах использовались форсунки с индукционным зарядом капель. Суммарный заряд на грамм воды при оптимальном размере капель и при отрицательном напряжении на форсунке, равным 900 В, составлял $2,7 \cdot 10^{-6}$ к/г.

Из литературы и опытов, проведенных в лаборатории, известно, что пыль имеет обычно биполярную и симметричную заряженность, т. е. 80 – 95 %

взвешенных в воздухе пылевых частиц заряжены отрицательно и положительно примерно поровну. Остальная их часть не заряжена.

Чтобы установить влияние знака и рода заряда капель на эффективность осаждения пыли, была проведена серия опытов. Максимально возможные значения напряжений на форсунке, которые удалось получить в условиях шахт, оказались равными -900, +700 и 600 В переменного тока. При прочих равных условиях в разных опытах на электрофорсунку подавалось напряжение -900, +700 или переменный ток 600 В.

Для сравнения на одну форсунку подавалось -900, а на другую, работающую совместно, +700 В. Исследования показали, что степень осаждения пыли при условии равномерного напряжения на форсунках ниже, чем при подаче напряжения на обе форсунки -900 В. Это видимо объясняется тем, что нейтрализация зарядов противоположно заряженных капель вследствие их слияния происходит быстрее, чем захват ими пылинок. При напряжениях +700 и 600 В переменного тока эффективность осаждения оказалось еще ниже. Дальнейшие исследования проводились при напряжении на форсунках, равном -900 В.

Таблица 1 – Влияние расхода электрoзаряженной воды и скорости воздушного потока на степень потока на степень осаждения пыли, %

Скорость воздуха, м/сек	Удельный расход воды, л/м3			
	0,011	0,022	0,031	0,042
0,25	63	73	80	86
0,65	54	65	74	82
1,00	48	62	72	80
1,60	41	55	68	76
2,10	39	53	66	75
η_0^*	1,59	1,34	1,21	1,14

* η_0 – отношение степени осаждения при скоростях 0,25 и 2,1 м/сек.

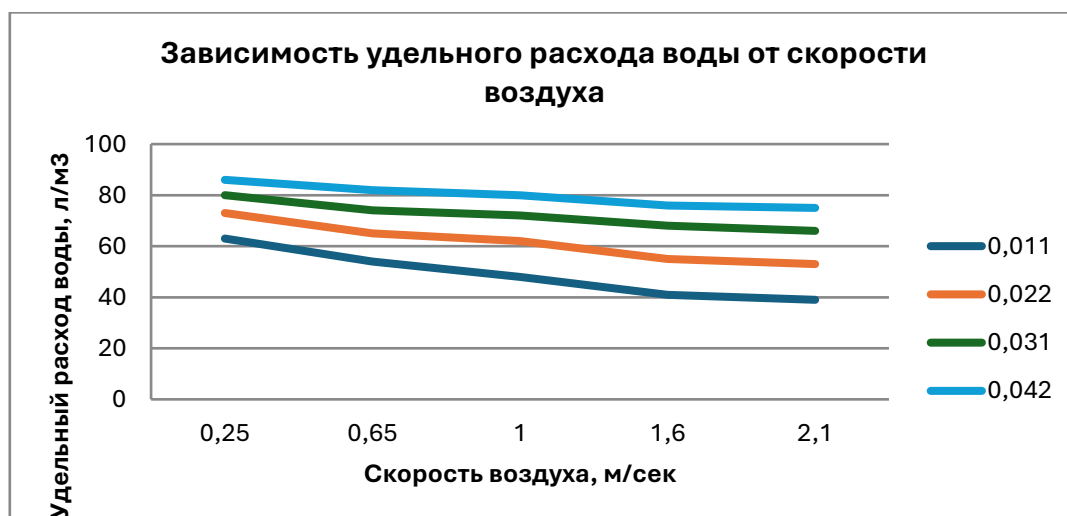


Рис. 1 Зависимость удельного расхода воды от скорости воздуха

В результате (таблица 1, рисунок 1) установлено, что с увеличением расхода воды степень осуждения пыли повышается, а с увеличением скорости воздушного потока понижается. Однако при увеличении расхода воды, влияние скорости воздуха на степень пыли уменьшается. Изменение концентрации пыли в воздухе в пределах 4 -22 мг/м³ не влияет на эффективность водяной завесы. На основе экспериментальных данных было выведено обобщенное выражение, отражающее изменение конечной запыленности в зависимости от скорости вентиляционного потока, расходы воды и начальной концентрации пыли:

$$N_k = 0,025 \frac{N_n \sqrt[4]{V}}{K^{0,7}} \frac{\text{мг}}{\text{м}^3},$$

N_k - конечная запыленность воздуха, мг/м³;

N_n - начальная запыленность воздуха, мг/м³;

V - скорость воздуха, м/сек;

q/Q - удельный расход воды, л/м³;

q - расход воды, л;

Q - количество прошедшего через завесу воздуха, м³;

Расход воды на единицу объема, проходящего по выработке возможно найти из следующего выражения:

$$K = \sqrt{\left(\frac{0,025 N_n \sqrt[4]{V}}{N_k} \right)^3}$$

Эффективность действия завесы с электрической зарядкой воды:

$$\eta = 100 - \frac{2,5 \sqrt[4]{V}}{K^{0,7}}, \%$$

Из теоретических исследований известно, а данными экспериментов (таблица 2) подтверждается, что снижение запыленности воздуха с помощью водяных завес без электрической подзарядки капель происходит в результате осаждения крупных пылинок. Мелкая пыль осаждается не более чем на 35%.

Таблица 2. – Степень осаждения пыли различной крупности с помощью водных завес без электрического подзаряда, %

V, м/сек	K, л/м ³	Размер пылинок, мк					
		<0,7	0,7–1,4	1,4–2,8	2,8–5,6	5,6–11	>11
0,25	0,240	18	18	24	45	33	42
	0,320	18	21	29	51	52	49
	0,640	25	28	29	46	54	51
	0,960	29	31	35	53	60	62
1,00	0,060	21	23	26	32	43	49
	0,080	23	22	31	36	43	54

2,10	0,160	24	25	32	49	58	65
	0,240	33	32	33	59	64	76
	0,029	21	22	29	34	57	65
	0,038	24	24	30	41	62	68
	0,076	27	28	33	38	64	68
	0,114	34	34	36	46	76	78

Применение завес с электрической зарядкой капель значительно повышает степень оседания не только крупной, но и мелкой пыли до 60% и более (Таблица 3). Количество не уловленной пыли размером до 2,8 мк при использовании электрозаряженной воды в полтора раза меньше, чем при обычном гидрообеспыливании; расход электрозаряженной воды в 10 раз меньше.

Без электрического подзаряда мелкодисперсные частицы (менее 2,8 мкм) задерживаются крайне плохо, так как они обладают малой массой, легко увлекаются воздушным потоком и слабо взаимодействуют с водой. Однако при использовании электрозаряженной воды степень осаждения этих частиц достигает 60 % и более, что видно по данным таблицы 3.

Для частиц крупнее 5 мкм электрозаряженные завесы обеспечивают почти полное осаждение (до 90–94 %), что сопоставимо с результатами обычного метода. Однако ключевым отличием является то, что эффективность не снижается для мелкодисперсной фракции — наоборот, она резко возрастает.

Наибольшая эффективность достигается при низкой скорости воздуха (0,25–0,65 м/с) и высоком удельном расходе воды ($K = 0,031–0,042$ л/м³).

При увеличении скорости воздуха до 2,1 м/с эффективность падает почти вдвое, особенно для мелкой пыли. Это связано с тем, что частицы не успевают вступить во взаимодействие с заряженными каплями.

Таблица 3. – Степень осаждения пыли различной крупности с помощью водных завес с электрическим подзарядом, %

V, м/сек	K, л/м ³	Размер пылинок, мк					
		<0,7	0,7–1,4	1,4–2,8	2,8–5,6	5,6–11	>11
0,25	0,011	37	47	60	71	71	74
	0,021	46	52	69	72	76	83
	0,031	50	54	72	72	80	87
	0,042	54	64	73	80	90	94
0,65	0,011	33	37	55	60	69	80
	0,021	34	41	62	66	74	83
	0,031	37	46	68	72	76	86
	0,042	34	54	79	82	80	88
1,10	0,011	24	27	41	45	64	66
	0,021	29	32	44	47	65	69
	0,031	35	36	47	56	68	71
	0,042	38	41	52	59	71	72

2,10	0,011	19	20	23	34	48	53
	0,021	27	28	33	33	50	58
	0,031	31	30	36	43	53	62
	0,042	34	39	45	52	56	66

Таким образом, эксперименты и выведенная на их основе функциональная зависимость в исследованных пределах показывают, что степень осаждения пыли электрозаряженной воды повышается с увеличением расхода воды, уменьшением скорости потока и не зависит от начальной концентрации пыли в воздухе. Выведенная зависимость позволяет определить необходимые расход воды для достижения заданной конечной запыленности воздуха.

Применение электрозаряженной воды увеличивает степень осаждения пыли и в особенности ее мелких фракций по сравнению с обычным гидро-обеспыливанием при значительно меньшем расходе воды.

Таким образом, исследование эффективности осаждения пыли электрически заряженными каплями воды представляет собой актуальную задачу, имеющую важное научное и практическое значение. Полученные результаты позволят не только углубить понимание процессов взаимодействия аэрозольных частиц и капель в электрическом поле, но и послужат основой для создания новых, более эффективных и энергоэкономичных систем очистки воздуха.

Список литературы

1. Afshari A., Yoon K., Hansen O. Electrostatic precipitators as an indoor air cleaner – A review // *Atmosphere*. – 2020. – Vol. 11, No. 6. – P. 619.
2. Li D., Zhang Y., Wang F. A review of electrostatic fog harvesting technology// *Nature Communications*. – 2025. – Vol. 16. – Article 372.
3. Zhang D., Hu G., Liu C. Design of a cyclone separator with a wetted wall for particle removal // *Separation and Purification Technology*. – 2023. – Vol. 310. – p. 123.
4. Sadeghpour A., Karimi M. Experimental investigation of a counterflow wet scrubber for submicron particle removal // *Powder Technology*. – 2021. – Vol. 385. – p. 485–496.
5. U.S. Environmental Protection Agency. Wet Electrostatic Precipitator System Study: Technical Report. – Washington: EPA, 2019. – 72 p.
6. Teng C., Li H., Wang S. Experimental Study on Particle Removal of a Wet Electrostatic Precipitator // *Energy & Fuels*. – 2020. – Vol. 34, No. 9. – p. 25–34.
7. Badami M.M., Ahmadi S., Kazemi R. Design, optimization, and evaluation of a wet electrostatic precipitator for fine particle removal // *Journal of the Air & Waste Management Association*. – 2023. – Vol. 73, No. 5. – p. 589–602.
8. Xu R., Chen L., Wu K. Improvement of aerosol spray scavenging efficiency by pre-charging droplets // *Aerosol Science and Technology*. – 2024. – Vol. 58, No. 3. – p. 245–257.

ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ӨНДІРІСТІК ЖАРАҚАТТАРДЫҢ АЛДЫН АЛУ ЖӘНЕ ЕҢБЕКТІ ҚОРҒАУДА ТӘУЕКЕЛДЕРДІ БАҒАЛАУ ЖӘНЕ ЕСЕПТЕУ ӘДІСТЕРІ

Құлжанова Д.Б.

Ғ.Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Алматы қ., Қазақстан

*e-mail: di.kulzhanova@aes.kz

1 Кіріспе

Қазіргі жаһандану және индустрияландыру дәуірінде еңбек қауіпсіздігі мәселесі күн тәртібіндегі ең өзекті тақырыптардың біріне айналды. Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының деректеріне сәйкес, жыл сайын әлемде өндірістік жарақаттардың саны 125 миллионға жуықтайды, олардың шамамен 220 мыңы қайғылы жағдаймен аяқталады. Кәсіптік жарақаттар өлім-жітім себептерінің ішінде жүрек-қан тамырлары және онкологиялық аурулардан кейінгі үшінші орында тұр. Осындай күрделі ахуал жағдайында қауіпсіз еңбек жағдайларын қамтамасыз ету мемлекеттердің басты міндеттерінің біріне айналып отыр [1].

Еңбек қызметі барысында әрбір жұмысшы белгілі бір қауіпті және зиянды өндірістік факторларға тап болады. Бұл факторлар жазатайым оқиғаларға, апаттарға және кәсіби ауруларға әкелуі мүмкін. Осындай жағдайлардың алдын алу үшін өндірістік тәуекелді талдау және сандық тұрғыда бағалау қажет.

2 Зерттеудің мақсаты

Өндірістік тәуекелді бағалау әдістерін қарастыру және нақты деректер негізінде есептеу жүргізу. **Міндеттері:**

- өндірістік тәуекел ұғымын ашу;
- тәуекелді бағалаудың негізгі әдістерін қарастыру;
- коэффициенттер арқылы есептеу мысалын көрсету;
- алынған нәтижелерді талдау және интерпретация жасау;
- тәуекелді төмендету бойынша ұсыныстар беру.

3 Алынған нәтижелер және оларды талқылау

Өндірістік тәуекел – белгілі бір уақыт аралығында жұмысшының жазатайым оқиғаға ұшырау ықтималдығы. Абсолютті қауіпсіздік мүмкін емес болғандықтан, тәуекел әрқашан салыстырмалы сипатта болады [2].

Тәуекел екі құрамдас бөліктен тұрады:

1. **Ықтималдық (жиілік)** – қауіпті оқиғаның қаншалықты жиі қайталануы.
2. **Салдар (ауырлық)** – қауіпті оқиға орын алған жағдайда оның қаншалықты зиян келтіретіні [3].

Мысалы, жұмысшының қолын аздап жарақаттап алу ықтималдығы жоғары, бірақ салдары жеңіл. Ал өндірістегі жарылыс ықтималдығы төмен болғанымен, салдары өте ауыр болуы мүмкін. Сондықтан тәуекелді бағалауда осы екі факторды бірге қарастыру қажет.

Халықаралық тәжірибе бойынша тәуекел деңгейлері [5]:

Қауіпсіз деңгей: $R < 10^{-6}$ $R < 10^{-6}$ – іс жүзінде тәуекел жоқ.

Қабылданатын деңгей: $10^{-6} \leq R \leq 10^{-4}$ $10^{-6} \leq R \leq 10^{-4}$ – аздаған қауіп бар, бірақ бақылауға болады.

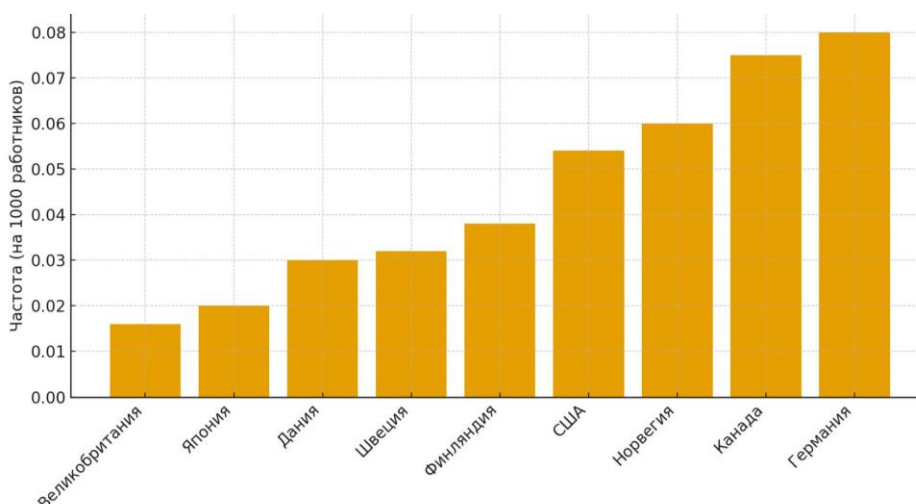
Қауіпті деңгей: $10^{-4} \leq R \leq 10^{-3}$ $10^{-4} \leq R \leq 10^{-3}$ – алдын алу шараларын міндетті түрде жүргізу қажет.

Өте қауіпті деңгей: $R > 10^{-3}$ $R > 10^{-3}$ – мұндай тәуекелді ешбір жағдайда қабылдауға болмайды.

Тәуекел тек сапалық тұрғыда емес, сандық тұрғыда да бағалануы тиіс. Сандық бағалау кәсіпорындағы нақты жағдайды анық көрсетіп, басқарушылық шешімдер қабылдауға мүмкіндік береді.

Өндірістік жарақаттанушылық – бұл еңбек қызметі барысында қауіпті факторлардың әсерінен пайда болатын жарақаттар жиынтығы. Ол күрделі әлеуметтік-экономикалық және техникалық құбылыс болып табылады.

Халықаралық тәжірибеде өндірістік жарақаттанушылық деңгейі әр елде әртүрлі. Деректер бойынша (1000 жұмысшыға шаққанда) [7]:



Сурет 1. - Өнеркәсіп орындарында жарақат алу себептерінің статистикасы. Бұл көрсеткіштер дамыған мемлекеттердің өзінде өндірістік тәуекелдің бар екенін дәлелдейді.

Адамның ешбір қызмет түрінде абсолютті қауіпсіздікке қол жеткізу мүмкін емес, яғни қолайсыз оқиғаның пайда болу қаупін толықтай нөлге дейін азайту мүмкін емес. Сондықтан қабылданатын қауіп-қатер ұғымы қолданылады. Ол — заманауи ғылыми, техникалық және технологиялық жетістіктерді, сондай-ақ мемлекеттің экономикалық және әлеуметтік мүмкіндіктерін пайдалану арқылы қамтамасыз етілетін тәуекелдің белгілі бір төмен деңгейін білдіреді.

Қабылданатын тәуекел — бұл белгілі бір қызмет түрінің қауіпсіздік деңгейі мен сол деңгейге жету мүмкіндіктері арасындағы ымыралы ұғым. Жалпы қабылданған тәсілдерге сәйкес, кәсіби қызмет барысында орташа (қабылданатын) тәуекел деңгейі 10%-дан аспаса, ол қауіпсіз деп саналады (яғни жыл ішінде 10 000 адамның ішінде бір адамның қаза болу ықтималдығы) [5]. Жеке қаза табу қаупінің ең жоғары деңгейі жылына 10^{-3} құрайды, ал елеусіз (пренебрежимо малый) деп саналатын тәуекел деңгейі жылына 10^{-8} болады [8].

Тәуекелдің ықтималдық сипатын ескере отырып, оны есептеу үшін математикалық статистиканың стандартты әдістері қолданылады. Мысалы, өндірісте белгілі бір жарақат санының пайда болу ықтималдығын Пуассон үлестіруі арқылы анықтауға болады [6]:

$$P(r) = \frac{e^{-\lambda} * \lambda^r}{r!}$$

800 жұмысшының ішінде жылына 24 жарақат тіркелген. Орташа мәні:

$$\lambda = \frac{24}{800} = 0.03$$

Жарақат алмау ықтималдығы:

$$P(0) = e^{-0.03} \approx 0.9704 \text{ (97\%)}$$

1 рет жарақат алу:

$$P(1) = \frac{0.03^1 \cdot e^{-0.03}}{1!} \approx 0.0291 \text{ (2.9\%)}$$

2 рет жарақат алу:

$$P(\geq 2) = 1 - P(0) - P(1) \approx 1 - 0.9704 - 0.0291 = 0.0005 \text{ (0.05\%)}$$

Бір жұмысшының бір жылда жарақат алмау мүмкіндігі $\approx 97\%$.

Бір рет жарақат алу ықтималдығы $\approx 3\%$.

Екі не одан көп жарақат алу ықтималдығы $\approx$ өте аз (0.05%).

Көп жағдайда жұмысшы жарақат алмайды, бірақ 3% жағдайда бір рет жарақат алуы мүмкін. Бірнеше рет жарақат алу ықтималдығы өте төмен.

Жиілік коэффициенті (ЖК)

Бұл көрсеткіш өндірістегі жазатайым оқиғалардың қаншалықты жиі болатынын көрсетеді. Ол 1000 жұмысшыға шаққанда есептеледі [2].

$$ЖК = \frac{N * 1000}{P}$$

- N – жазатайым оқиғалар саны,
- P – жұмысшылар саны.
- Кәсіпорында 800 жұмысшы бар, бір жылда 24 жазатайым оқиға болған.

$$ЖК = \frac{24 * 1000}{800} = 30$$

Бұл дегеніміз – орта есеппен әрбір 1000 жұмысшыға 30-дан астам жазатайым оқиға келеді.

2. Ауырлық коэффициенті (АК)

Бұл көрсеткіш жарақат алғандардың қанша күн еңбекке жарамсыз болғанын сипаттайды [2].

$$AK = \frac{D}{N}$$

- D – жарамсыздық күндерінің жалпы саны,
- N – оқиға саны.

Барлық жазатайым оқиғалар бойынша жұмысшылар 120 күн еңбекке жарамсыз болған, ал оқиғалар саны – 5.

$$AK = \frac{576}{24} = 24$$

Орта есеппен әрбір оқиға 24 күндік еңбекке жарамсыздыққа әкелген.

3. Қауіп деңгейі (ҚД)

ЖК мен АК көбейтілгенде кәсіпорынның нақты тәуекел деңгейі анықталады [4].

$$ҚД = ЖК \times АК = 30 \times 24 = 720$$

Бұл көрсеткіш 720-ге тең, яғни тәуекел деңгейі жоғары саналады.

Кәсіпорындағы өндірістік тәуекелдерді төмендету үшін кешенді шаралар қажет. Ең алдымен ұйымдастырушылық бағытта еңбек қауіпсіздігіне жауапты құрылымдардың жұмысын күшейтіп, әр жұмыс орнында тәуекелді жүйелі түрде бағалау мен бақылау жүргізу маңызды. Қауіпсіздік техникасына қатысты нұсқаулықтар үнемі жаңартылып, қызметкерлерге түсінікті тілде жеткізіліп отыруы тиіс. Техникалық тұрғыдан алғанда, өндірістік жабдықтарды уақытылы тексеріп, ақауларды дер кезінде жою, сондай-ақ заманауи қауіпсіздік технологияларын енгізу тиімді нәтиже береді. Жұмысшыларды жеке және ұжымдық қорғаныс құралдарымен толық қамтамасыз ету – тәуекелді азайтудың негізгі шарттарының бірі. Кадрлық саясатта еңбек қауіпсіздігі бойынша тұрақты оқыту мен тәжірибелік тренингтер ұйымдастыру ерекше маңызға ие. Сонымен қатар қауіпсіздік талаптарын қатаң сақтаған қызметкерлерді материалдық және моральдық тұрғыдан ынталандыру, ал жарақат алғандарға медициналық және психологиялық қолдау көрсету еңбек мәдениетін нығайтады. Жүйелік басқару деңгейінде халықаралық стандарттарға сәйкес тәуекелдерді басқару жүйесін кезең-кезеңімен енгізу ұсынылады. Бұл бағытта кәсіпорын бойынша қауіпсіздік көрсеткіштерін сандық тұрғыда талдау, тәуекел карталарын жасау және басқарушылық шешімдерді ғылыми негізде қабылдау қажет.

4 Қорытынды

Өндірістік тәуекелдерді басқару – кәсіпорынның тұрақты әрі қауіпсіз жұмыс істеуінің негізгі тетігі болып табылады. Жүргізілген талдау нәтижесінде еңбек процесінде орын алатын жарақаттар мен қауіп-қатерлердің белгілі бір заңдылықтары бар екені анықталды. Теориялық негіздерге сүйене отырып

жасалған бағалау тәсілдері тәуекел деңгейін алдын ала болжауға және оны азайтуға бағытталған нақты шешімдер қабылдауға мүмкіндік береді.

Зерттеу барысында кәсіби тәуекелдерді есептеу әдістерінің тәжірибеде қолдануға ыңғайлы екені дәлелденді. Мұндай тәсілдер кәсіпорында қауіпсіздік мәдениетін қалыптастыруға, жұмысшылардың еңбек жағдайын жақсартуға және өндірістік жарақаттардың алдын алуға негіз болады. Жалпы алғанда, өндірістік тәуекелдерді басқару жүйесін жетілдіру тек жұмыс берушінің емес, сонымен қатар әрбір қызметкердің ортақ міндеті болып табылады. Қауіпсіздік ережелерін сақтау, заманауи технологияларды енгізу және тәуекелдерді үнемі бақылап отыру арқылы ғана кәсіпорын тұрақты әрі тиімді қызмет ете алады.

Әдебиет тізімі:

1. Шаяхметова Л.М., Курманов А.М., Айтимова Ш.Т. Қазақстан Республикасында еңбекті қорғауды жетілдіру // *National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan Bulletin of Science*. [Электрондық ресурс]. – Қолжетімді: <https://journals.nauka-nanrk.kz/bulletin-science/article/view/6898/4713>
2. Жанпейісов Б., Ахметов Т.Е. Өндірістік қауіпсіздік негіздері. – Алматы: Білім, 2019. [Электрондық ресурс]. – Қолжетімді: <https://kazneb.kz> (іздеу арқылы)
3. Көшкімбаев Қ.Қ. Еңбекті қорғау және өнеркәсіптік қауіпсіздік. – Алматы: Эверо, 2018. [Электрондық ресурс]. – Қолжетімді: <https://kazneb.kz>
4. ГОСТ 12.0.230-2007. Система стандартов безопасности труда. Управление профессиональными рисками. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2007. [Электрондық ресурс]. – Қолжетімді: <https://docs.cntd.ru/document/1200059884>
5. ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines. International Organization for Standardization. [Электрондық ресурс]. – Қолжетімді: <https://www.iso.org/standard/65694.html>
6. Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Risk Management Guidelines. – Washington, 2020. [Электрондық ресурс]. – Қолжетімді: <https://www.osha.gov/risk-management>
7. Ale B.J.M., Bellamy L.J., Cooke R.M. Quantifying occupational risk: The development of risk matrices // *Safety Science*. – 2006. [Электрондық ресурс]. – Қолжетімді: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2006.03.002>
8. Хуторской А.В. Оценка и управление профессиональными рисками. – М.: Академия, 2017. [Электрондық ресурс]. – Қолжетімді: <https://elibrary.ru>

ИНЖЕНЕР АДАМИ КАПИТАЛ ИЕСІ РЕТІНДЕ ПОСТИНДУСТРИАЛДЫ ҚОҒАМНЫҢ ӨНДІРГІШ КҮШІ ЖӘНЕ ОНЫ ҚАРЖЫЛАНДЫРУ МЕХАНИЗМДЕРІ

Нұрпейіс Е.М.

Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы
e-mail: y.nurpeiis@aes.kz

Нарығы кемелденген индустриалды цифрландырылған қоғамның экономикалық өсуінің қайнар көздері инновациялар мен адами капитал саналады. Адам, жұмыс күші ретінде және оның еңбекке деген қабілеті, ниеті, талабы әрқашанда қоғамдық өндірістің приматы болып қала береді. Индустрияға дейінгі қоғамда еңбек өнімділігі физикалық, яғни қара күш еңбегінің басымдығымен сипатталса, индустриалды цифрлы экономикада ақыл-ой еңбегінен көрініс табады. Өндірісте интеллектуалды еңбектің өсуі өз кезегінде өндіріс құралдарының дамуын жетілдіру мен еңбек өнімділігінің артуына жеткізуі заңды процесс. Осылайша, интеллектуалды еңбек, ұлттық экономикада еңбек өнімділігінің артуына және жалдамалы жұмыс күшінің бос уақыттың пайда болуына сол сияқты табысының артуына әкелді. Қазір дамыған елдердің экономикалық белсенді азаматтарының 50 пайызынан астамы инженерлік ой еңбегімен шұғылданады. Интеллектуалды еңбектің мазмұны, өндіргіш күштерге қойылатын талаптарды, еңбекті ұйымдастыру әдістері мен адам тәрбиесіне деген көзқарас түбегейлі өзгертті. Постиндустриалды қоғамда жалдамалы өндіргіш күштің рөлі жалдамалы білікті инженер маманға ауысқандығы еңбек өнімділігінен туындалатын құн заңы мен пайдалы шек теориясының нарық сұранысы мен ұсынысына мемлекеттік реттеуді еріктен тыс қолдануға әкелетінін естен шығармаған дұрыс. Жұмыс күші - еңбекке қабілеттілік; адамның өмір сүруіне қажетті игіліктерді өндіру процесінде пайдаланатын денемен бітіскен қара күші және рухани қабілеттерінің жиынтығы. Жұмыс күші еңбек арқылы жұмыс жасау процесінде дамиды және жетіледі. Капитал үстемдік еткен нарықтық экономикада жұмыс күшінің - инженердің құны және тұтыну құны трансформацияланады. Инженер жұмыс күші ретіндегі тұтыну құны жалдаушы - жұмыс берушіге пайда кіргізу қабілетімен сипатталса, құны отбасын асырауға қажеттілер құнының жиынтығымен сипатталады, ол кем дегендегі құн көрістің төменгі шегімен анықталады.

Дегенмен, экономика ғылымында өндіріс құралдарының детерминизмі

XX ғасырға дейін үстемдік етіп келді және сол ғасырдың ортасында ғана адами капитал теориясының дамына жеткілікті алғы шарттар пайда бола бастады.

Қазіргі заманғы кәсіпорындарда еңбек өнімділігі жұмысшылардың қара күш еңбек ептілік қабілетінде емес, олардың біліктілігі мен кәсіби шеберлігіне, технология мен техника деңгейіне, өндіріс ұйымдастырылуына, менеджментке және басқа факторларға байланысты.

Заманауи экономикадағы адами капиталды, (адамның) жалдамалы жұмыс күшінің жақсы өмір сүруіне, жетерліктей табыс табуына немесе көп мөлшерде жалақы алуына пайдаланатын білімі, денсаулығы, дағдылары мен тәжірибесінің жиынтығы деп түсінеміз. XX ғасырдың ортасында ағылшын-саксон ғалымдары Т. Шульц пен Г. Беккер өз еңбектерінде, «адами капитал» ұғымын негіздеп: білім, біліктілік және генетикалық артықшылықты, жалақы, табыс және пайда табу көзі ретіндегі «өндіріс құралы» мен «ұзақ пайдалануға жарамды әрі қолмен ұстап көруге келмейтін қабілет» деп түйіндеді [1. 99-107; 93-98].

Постиндустриалды елдерде адамдардың өмір бойы кәсіби білім алуын қамтамасыз ететін ғылым-білім беру жүйелерін халық шаруашылығын дамытудың негізгі факторы рөлі деңгейіне көтерілді және «үздіксіз білім алу, дағдыларды жетілдіру арқылы пайда, табыс және жалақы табу қабілеті бір ырғақта дамыту өмір циклына» айналдырды.

Ғылыми-техникалық революция және өндіргіш күштердің жедел дамуы тұсында жалдамалы инженердің өзі экономикалық өсу факторына айналады. Негізгі өндірістік қорларды пайдаланудың тиімділігі жұмысшылардың рухани және материалдық мүдделеріне көбірек тәуелді. Адами капитал табиғи ресурстарға немесе жинақталған байлыққа қарағанда құнды ресурс қатарына жатады. Нарықтық экономикада бәсекеге қабілеттіліктің, экономикалық өсудің және өндіріс тиімділігінің қайнар көзі болып адами капитал иесі инженер және оның бәсекелік қабілеті деп қабылдаймыз. "Адами капитал - табиғи ресурстардан немесе жинақталған байлықтан әлдеқайда маңызды ең құнды ресурс. Бұл бәсекеге қабілеттіліктің, экономикалық өсудің және тиімділіктің негізі болып табылатын зауыттар, жабдықтар мен табиғи қорлар емес, адами капитал " деп жазды АҚШ зерттеушісі Д. Грейсон [2. 195].

«Адамдарды, адами капиталды жинақтауға итермелейтін мотивтер - білім, кәсіби біліктілік, табыс деп жазды XX ғасырдың басында А. Маршалл»[3.207]. Кәсіпорындарда жұмысшылардың оқуына және біліктілігін арттыруға жұмсалатын қаржылай шығындар әдетте айналым қаражатынан қаржыландырылды. Білімді, білікті маманның еңбегі білімсіз қара күш еңбегіндегі адаммен салыстырғанда өнімдірек болады, яғни білімге жұмсалатын шығындарды табыс пен ұлттық байлықты арттыратын инвестицияға теңестіруге болады. Демек, адам қабілеттерін жинақтаудағы инвестицияларды капиталдың ерекше нысаны ретінде тануға болады, оның маңыздылығы өндіріс технологиясының күрделенуіне, еңбекті ақпараттандыруға және интеллектуалдандыруға байланысты келешекте пайда кіргізетін шығындар. Бір сөзбен айтқанда пайда табуға бағытталған инвестиция. Экономист ғалымдардың пайымдауы бойынша, адами капитал постиндустриалды қоғамның маңызды қол жеткізген жетістігі мен өндіріс ресурстары болып табылады. Байлық, өндіріс

техникасымен технологиялық білім мен ұйымдастырушылықты жетілдіру арқылы келеді. Тек, тәжірибелі білікті жұмыс күші инженер ғана жоғары технологиялық процесті басқара алады. Сонымен қатар, іскерлік жағдайды, нарықтық мүмкіндіктерді, оларды іс жүзінде қолдану тәсілдерін меңгеру қажет, бірақ бұл жағдайда бізге қоғамның байлығын құру үшін өндіріс процесінде қолданылатын адамның білімі мен интеллектуалды капиталының қаншалықты заманауи талапқа сай екенін білу қажет. Сонымен, экономикадағы адами капитал деп, жалдамалы жұмыс күшінің - инженердің табыс табу мақсатындағы қолданылатын білімі, денсаулығы, дағдылары, тәжірибелері мен генетикалық байлығы, қоры деп қабылдаймыз.

Демек, "адами капитал" ұғымының мазмұнын мыналардан көру керек:

- жұмыс күшінің - инженердің алған білімін, біліктілігін, жинақталған дағдыларынан;
- бұл қордаланған қорды қоғамдық жұмыстың белгілі бір саласында қолданғанынан және бұл еңбек өнімділігі мен өндірістің өсуіне ықпалынан;
- осы қорды пайдалану жұмыс күшінің – жалдамалы инженердің жалақысы мен жұмыс беруші пайдасының өсуінен;
- табыстың, жалақының артуы жалдамалы жұмыс күштерінің білімге деген ынтасына ықпал етеді және адами капиталға одан әрі инвестициялауға еріктен тыс итермелейтіндігінен;
- адамның оқу - білім еңбегімен келген қабілеттері, сондай-ақ генетикалық бейімділігі және т. б. әр субъектінің ажырамас бөлігі болып қалуынан;
- адами капиталды дамыту оны жетілдіру процесі толығымен аяқталуынан;
- адамдардың білім және генетикалық қоры арқылы қордаланған рухани байлығы мен тәрбиесінен.

Сонымен, экономист ғалымдардың ұстанымы бойынша адами капитал формуласы келесі түрде көрініс тапқан:

$AK = KB + KD + KM + KT$, Мұндағы:

AK - адами капитал;

KB - капитал білім;

KD – капитал денсаулық;

KM- капитал мәдениет.

KT- капитал тәрбие

"Адами капитал" ұғымын анықтаған кезде келесі ерекшеліктерді ескерген дұрыс.

1. Адами капитал индустриялық қоғамның басты құндылығы, сондай-ақ экономикалық өсудің негізгі факторы болып табылады.

2. Адами капиталды қалыптастыру субъектінің отбасы бюджетінен және мемлекеттік бюджет есебінен қаржыландырылады.

3. Адами капитал жинақталуы мүмкін, егерде, жекелеген адамдар белгілі бір дағдыларды, қабілеттерді игере отырып, өзінің денсаулығын бір қалыпта ұстаған жағдайда.

4. Адам капиталы өмір бойы білім алумен шектелмейді, ол физикалық және моральдық тұрғыдан тозады. Жеке адамдардың білімі белгілі бір уақыттан кейін ескіреді, яғни өмір сүру, жұмыс істеу процесінде адами капиталдың құны өзгереді, осыдан келе адами капитал амортизацияланады және құнсызданады.

5. Адами капиталға инвестиция ұзақ уақытты талап етеді. Егер білім берудің адами капиталына инвестиция 15-25 жыл болса, ал адам денсаулығына өмір бойы капитал салынады.

6. Адами капитал өз иесіне болашақта тұрақты табыс береді. Адамға инвестициялар қоғамның экономикалық және әлеуметтік ілгерілеуіне тікелей әсер етеді.

7. Адами капитал өтімділік дәрежесі бойынша нақты капиталдан ерекшеленеді. Адами капиталды тасымалдаушы инженерден немесе иесінен бөлуге келмейді, яғни ажыратылмайтын бөлік.

8. Адами капиталдан болашақта алатын табысты инвестициялау көздеріне қарамастан, оны жалдамалылардың өздері еңбек нарығындағы сұранысқа қарай инженер мамандығын таңдауына тікелей тәуелді.

9. Ұрпаққа адами капиталды дұрыс қалыптастыру ата-ананың балаларына мамандық таңдаудағы дұрыс бағыт беруіне, олардың болашақты еркін және сауатты болжауына байланысты. Адами капиталды қолданудан қайтарым дәрежесі адамның жеке мүдделеріне, оның артықшылықтарына, оның материалдық және моральдық мүдделілігіне, дүниетанымына, оның мәдениетінің жалпы деңгейіне тәуелді.

Адами капиталды қалыптастырудың экономикалық себептерін қарастыра отырып, өндіріс құралдарынан оқшау қалған адам өз еңбегін, өзгенің өндіргіш күшін өзіне тиесілі дербес қабілетін, капитал немесе тауар ретінде сатудан басқа амалының жоқ екендігін атап өткен жөн. Кәсіпкер оларды өз кәсіпорнының табысты жұмыс істеуі үшін қажетті басқа да активтерді сатып алғандай сатып алады. Жалдамалылар үшін оның жеке қабілеті тауар ретінде көрінеді, ал капиталист немесе жалдаушы үшін - бұл жұмысшыларды жалдауға (пайдаға) жұмсалған капиталдың авансталған құнының капиталдандырылған бөлігі. Ғалымдардың пікірінше, байлықты, пайданы әрдайым кәсіби инженерден көрініс тапқан жалдамалы жұмыс күші өндіреді. Қоғамда жасаған өндіріс құралдары, зауыттар техникалық білім мен ғылым арқылы өмірге келеді. Кәсіпорынның түрлі дәрежедегі білікті менеджерлер аппараты ғана емес, сондай-ақ денсаулығы мықты, әрі қарым-қатынас мәдениеті жоғары білікті жұмыс күші - инженер болуы тиіс, әйтпесе заманауи ең жетілдірілген техника ойлаған нәтижені бермейді.

Өндірістің заттай факторларының амортизациялық аударымдары пайдалануға берілгеннен кейін келесі айдан бастап жүргізіледі. Алайда адами капитал амортизациясының орны ерекше. Экономикалық әдебиетте қордаланған ғылым-білім беру әлеуетінің моральдық және физикалық ескіру процесі әртүрлі ракурстардан қаралды. Экономистердің пікірінше, адами капиталды пайдаланудың алғашқы жылдарында, инженердің физикалық өсуі және

өндірістік тәжірибе жинақтау есебінен оның экономикалық құндылығы төмендемейді, керісінше өседі. Зияткерлік капитал бірінші онжылдық ішінде ұлғаюда. Екінші онжылдықтың соңына қарай зияткерлік капитал қорының моральдық және физикалық тозуының өсу қарқыны адами капитал есебінен жабылады.

Осы кезеңнен бастап адам капиталының құнсыздану үдерісі жүруде және оның қарқыны үшінші онжылдықтың соңына қарай арта түседі. Дегенмен, еңбек жолы аяқталғаннан кейін де адами капиталдың амортизациясы толық өтелді деп айтуға болмайды. Егер ондаған жылдар бойы дербес адам капиталына, оның құрамдас бөлігіне (білім беру, денсаулық, өнер бөлігінде) үнемі инвестиция салып отырса, онда бұл жағдайда да адами капиталдың құнсыздануы туралы айтуға болмайды. Адами капитал сандық және сапалық тұрғыдан да бағаланады: адамдардың жалпы саны, халықтың еңбекке жарамды белсенді саны, студенттер саны және т.б. Сапалық сипаттамаларына: шеберлік, білім, сондай-ақ адамның еңбек қабілеттілігіне әсер ететін және еңбек өнімділігін арттыруға ықпал ететін факторлар жатады. Экономистер еңбек өнімділігін одан әрі арттыру мақсатында жұмсалған және болашақта индивидтің жеке табыс өсіміне және жұмыс берушінің пайдасына ықпал ететін шығындарды «адами капиталға инвестициялар» деп атайды.

Экономиканың заманауи жағдайында адами капиталдың иегерлері қоғам құндылығына және экономикалық өсудің басты факторына айналған. Классиктер заманында өндірісте білімсіз жұмысшылардың қарапайым қара күш еңбегі қолданылса, индустриалды қоғамда ақыл-ой еңбегінің үлесі артып білікті кәсіби мамандарға (инженерлерге) басымдылық берілді. Білім мен біліктілік жұмыс күшінің құнын қымбаттатады, бұл өз кезегінде еңбек өнімділігінің артуына, тауар сапасының жақсаруына және қоғамдық сұранысты дер кезінде қанағаттандырылып, тауар дефициті мен тауар фетишизмін жояды.

Социалистік қоғамдық өндірістің түбегейлі және техникалық жаңарулары шамамен 40-50 жылда бір рет болатын және ЖОО-да 6-8 жылда алынған білімі маманның еңбек жолы мен ғұмырының соңына дейін жететін, бұл ретте негізгі капиталды жаңарту қажеттілігі физикалық емес, моральдық қартаюмен немесе моральдық тозуымен түсіндіріледі. Индустриалды Еуропа елдерінде кәсіби білікті жалдамалы жұмыс күші инженерлерді нарық сұранысына даярлау, ротациялау мерзімі жеті әрі кеткенде тоғыз жылға ұзартылған. Осы реформаны жүзеге асыру мақсатында «үздіксіз білім» және «екінші жоғарғы білім» жобасы енгізілді. Білім беру, денсаулық сақтау, кәсіби қайта дайындық, экономикалық маңызы бар ақпаратты іздеу, жұмыс күшінің мобилдігі, жас жеткіншектерді, келер ұрпақты тәрбиелеу оларды өмірге, еңбек нарығындағы сұранысықа бейімдеу шығындарын батыстық экономистер «адами капиталға инвестициялардың» негізгі бағыттарына жатқызды. Еңбек нарығындағы кәсіби инженерлік мамандыққа сұраныс пен ұсыныс және кәсіби инженерлік еңбектің моральды тозуы «еңбекті ауыстыру» қағидасына қайшы емес, керісінше заңды құбылыс деп қабылдаған жөн. Постиндустриалды цифрлы қоғамның еңбек

нарығындағы сұраныс пен ұсыныс заңына сай жаңа инженерлік мамандықтардың пайда болуы мен кейбір инженерлік мамандықтардың еріктен тыс жойылуы экономикалық нормаға айналады.

Әдебиеттер тізімі

1. Беккер Г.С. Экономика семьи и макроповедение //США: экономика, политика, идеология. 1994. № 2. С. 99-108; № 3. С. 93-98.
2. Грейсон Д., Долл О. Американский менеджмент на пороге XXI века. М.: «Экономика». 1991. 267 с.
3. Маршалл А. Принципы экономической науки.Т.2. М.:1999. 310 с.

ӘОЖ 504.062.2; 631.9

ТАБИҒИ СУЛАРДЫ ТАЗАРТУ ӘДІСТЕРІ

Сұлтанбек А.С.*

Ғ.Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Алматы қ., Қазақстан
e-mail: ai.sultanbek@aes.kz

Аңдатпа: Бұл мақалада Алматы облысының табиғи сулардың сапасы мен оларды тазарту мәселелері қарастырылған. Соңғы жылдары өзен-көлдерге тұрмыстық, ауыл шаруашылық және өнеркәсіптік ағындылардың шамадан тыс түсуі судың экологиялық жағдайын айтарлықтай нашарлатуда. Су құрамында нитраттар, фенолдар, пестицидтер, мұнай өнімдері және бактериялардың шекті рұқсат етілген концентрациядан бірнеше есе артық кездесетіні анықталған. Бұл жағдай халық денсаулығына, экожүйелердің тұрақтылығына және ауыз су сапасына тікелей қауіп төндіреді. Мақалада табиғи суларды тазартудың механикалық, физика-химиялық және биологиялық әдістерінің тиімділігі талданады. Сонымен қатар, су қорғау шараларының ұзақ мерзімді экономикалық тиімділігі көрсетіліп, экологиялық қауіпсіздікті арттыруға бағытталған ұсыныстар берілген.

Түйін сөздер: Талғар өзені, су ресурстары, табиғи суларды тазарту, экологиялық қауіпсіздік, экономикалық тиімділік, мембраналық технологиялар, ШРК.

Кіріспе

Су – тіршіліктің басты қайнар көзі ғана емес, әлеуметтік-экономикалық дамудың да маңызды факторы болып табылады. Қазақстан табиғи су ресурстарына бай ел болғанымен, соңғы онжылдықтарда су сапасы мәселесі күрделене түсті [1]. Өнеркәсіп, ауыл шаруашылығы және тұрмыстық ағынды сулардың шамадан тыс түсуі өзендердің экологиялық жағдайын нашарлатуда.

Алматы облысындағы Талғар өзені – өңір халқы үшін ауыз судың маңызды көзі. Алайда жүргізілген зерттеулер оның құрамында нитраттар (1,8 ШРК), фенолдар (2 ШРК), пестицидтер (0,5 ШРК), мұнай өнімдері (0,25 мг/л, ШРК-дан 5 есе жоғары) және бактериялардың (7,57 млн кл./мл) бар екендігін көрсетті. Бұл көрсеткіштер өзен суының сапасын төмендетіп, экожүйелердің тұрақтылығына және халықтың денсаулығына тікелей қауіп төндіруде [2].

Қазақстанда қолданылып жүрген су тазарту жүйелері көбіне ескі жабдықтарға сүйеніп, заманауи талаптарға сай келмейді. Дәстүрлі механикалық, физика-химиялық және биологиялық әдістердің тиімділігі шектеулі. Сондықтан табиғи суларды тазартуда жаңа технологияларды, әсіресе кері осмос секілді мембраналық әдістерді қолданудың маңызы артып келеді [3].

Зерттеудің өзектілігі – Талғар өзенінің су сапасын жақсарту үшін тиімді тазарту әдістерін енгізу қажеттілігінде. Бұл мақалада өзен суының қазіргі жағдайы сипатталып, тазарту әдістерінің артықшылықтары мен кемшіліктері талданады. Сонымен бірге, су ресурстарын қорғауды жетілдіру бойынша ғылыми негізделген ұсыныстар беріліп, олардың экологиялық және экономикалық тұрғыдан тиімділігі қарастырылады.

Ғылыми нәтижелер

Зерттеу барысында Алматы облысының Талғар өзенінің гидрологиялық және экологиялық жағдайы талданды. Өзен суының сапасына жүргізілген сынамалар нәтижесі 1-кестеде көрсетілген.

1-кесте – Талғар өзені суының сапасы (зерттеу нәтижелері)

Ластаушы заттар	Концентрациясы, мг/л	ШРК, мг/л	Шектен дәрежесі асу
Азот нитрат	3.65	9.1	ШРК-дан аспайды
Азот нитрит	0.18	0.02	9 есе
Фенол	0.060	0.001	60 есе
Мұнай өнімдері	0.25	0.05	5 есе
СПАВ	0.15	0.10	1.5 есе
Бактериялар	7.57 млн кл./мл	—	Өте жоғары

Бұл деректер көрсеткендей, өзен суы орташа және жоғары деңгейде ластанған. Әсіресе фенол, азот нитриті және мұнай өнімдері бойынша шекті рұқсат етілген концентрация бірнеше есе артық.

Зерттеу барысында өзен суларын тазарту үшін қолданылатын негізгі әдістер бағаланды:

- **Механикалық әдіс** – ірі қоқыс пен қалқымалы заттарды жою (тиімділігі 60–70%).

- **Физика-химиялық әдіс** – сорбция, коагуляция, флотация, кері осмос (тиімділігі 85–95%).

- **Биологиялық әдіс** – микроорганизмдер арқылы органикалық заттарды ыдырату (тиімділігі 90%-ға дейін).

Тазарту әдістерінің салыстырмалы тиімділігі 2-кестеде келтірілген.

2-кесте – Тазарту әдістерінің салыстырмалы тиімділігі

Әдіс түрі	Артықшылықтары	Шектеулері	Тиімділік деңгейі
Механикалық	Қарапайым, арзан	Толық тазартпайды	60–70%
Физика-химиялық	Тұздар мен органикалық заттарды кетіреді	Қымбат реагенттер қажет	85–95%
Биологиялық	Экологиялық таза әдіс	Улы заттарға әсері шектеулі	80–90%
Кері осмос	Барлық ластағыштарды толық жояды	Жоғары шығын	99%

Халықаралық тәжірибені ескере отырып, Талғар өзенін тазартуда **кері осмос технологиясын** механикалық және биологиялық әдістермен кешенді қолдану ұсынылды [4].

Сонымен қатар, экономикалық талдау жүргізілді. Нәтижесінде ұсынылған кешенді технология бастапқы кезеңде шығынды қажет еткенімен, ұзақ мерзімді кезеңде:

- судың сапасын 90–95%-ға жақсартады,
- тұрғындарды таза ауыз сумен қамтамасыз ету деңгейін арттырады,
- экологиялық тәуекелдерді азайтады.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу нәтижелері Талғар өзенінің экологиялық жағдайы қанағаттанарлықсыз екенін көрсетті. Су сапасы бойынша фенол, мұнай өнімдері және азот нитритінің концентрациялары ШРК-дан бірнеше есе асып түседі. Бұл жағдай өзен суының экожүйесіне тікелей қауіп төндіреді.

Суды тазарту әдістерін талдау нәтижесінде:

-дәстүрлі механикалық және биологиялық әдістердің жеткіліксіз екені анықталды,

-физика-химиялық және мембраналық технологиялардың тиімділігі жоғары екені дәлелденді.

Қазақстанда су ресурстарын қорғауды жетілдіру үшін:

- Заманауи мембраналық технологияларды кезең-кезеңімен енгізу;
- Су сапасын автоматтандырылған бақылау жүйесін орнату;
- Тазартылған суды қайта пайдалану тәжірибесін дамыту;
- Экономикалық ынталандыру шараларын енгізу қажет.

Осы ұсыныстарды жүзеге асыру Талғар өзенінің экологиялық жағдайын жақсартуға, табиғи су ресурстарын ұтымды пайдалануға және халықты таза ауыз сумен қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Пайдаланылған әдебиеттер

1. Қазақстан Республикасының Су кодексі. – Астана: ҚР Әділет министрлігі, 2025. – 96 б.
2. Санитариялық ережелер мен нормалар (СанЕмН) 2.1.4.1074-01. Ауыз су. Гигиеналық талаптар мен сапа көрсеткіштері. – Алматы: ҚР Денсаулық сақтау министрлігі, 2021. – 78 б.
3. Ахметова, Г.Т. Қазақстандағы су ресурстарының сапасын басқару мәселелері // Экология және тұрақты даму. – 2022. – №4. – 45–52 б.
4. [World Health Organization (WHO). Guidelines for Drinking-water Quality. – 4th edition. – Geneva: WHO Press, 2017. – 631 p.

УДК 628.5 (075.8)

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЭЦ-3 НА ПРИРОДНУЮ ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Турумбетова Е.Б.,* Абикенова А.А.

НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека
Даукеева», Казакстан, г. Алматы
El.turumbetova@aues.kz

Аннотация: В статье представлена разработанная программа мероприятий по внедрению наилучших доступных технологий; проведен анализ внедрения и разработки организации системы экологического мониторинга; анализ состояния основного технического оборудования на ТЭЦ-3. В результате исследования были даны рекомендации по стадиям разработки и внедрения наилучших доступных технологий в процессах производства тепловой энергии на ТЭЦ.

Ключевые слова: экология, энергетика, тепловая энергетика, комплексные экологические разрешения,

Актуальность. Выбросы загрязняющих веществ оказывают воздействие на качество атмосферного воздуха и давление на окружающую среду. Повышенное загрязнение атмосферного воздуха негативно влияет на здоровье человека и устойчивость экосистем.

Основным видом топлива ТЭЦ-3 является твердое топливо–уголь. При сжигании топлива из дымовых труб в атмосферу выделяется пыль неорганическая, диоксид серы, оксид углерода, азота оксиды, зола мазутная. Основным источников выделений загрязняющих веществ в атмосферу являются котлоагрегаты котельного цеха, которые предназначены для получения пара высоких параметров и перегретой воды за счет сжигания топлива.

Примеси содержащие в выбросах тепловых электростанций, попадая в биосферу в районе расположения станции, вступив во взаимодействие с

окружающей средой, претерпевают различные изменения. Наиболее высокую биологическую активность имеет диоксид азота, он оказывает сильное раздражающее действие на слизистую оболочку глаз и дыхательные пути.

Оксись серы, попадающая с выбросами в атмосферу, наносит большой ущерб животному и растительному миру, она разрушает хлорофилл, имеющийся в растениях, повреждает листья и хвою.

Оксись углерода, попадая в организм человека и животных, соединяется с гемоглобином крови, в результате чего в организме возникает недостаток кислорода, и, как следствие, происходят различные нарушения нервной системы.

Учитывая всю опасность продуктов сгорания, выбрасываемых ТЭЦ, их проектирование и строительство должно вестись с максимальным соблюдением экологических требований, целью которых является недопущение выбросов вредных веществ, превышающих предельно допустимые концентрации и не оказывающих на организм человека прямого или косвенного негативного воздействия.

Выполнение комплекса мероприятий по охране атмосферного воздуха позволило соответствовать нормативам выбросов от котлов, установленных Техническим регламентом «Требования к эмиссиям в ОС при сжигании различных видов топлива в котельных установках тепловых электрических станций». Эмиссии в ОС осуществляются на основании разрешения на эмиссии, выданного Комитетом экологического регулирования и контроля Министерства энергетики РК.

Проблема качества воздуха имеет длительную динамику ухудшения. Это говорит о том, что нормативы ПДК, установленные для природопользователей сильно лояльны, что приводит к значительному накоплению загрязняющих веществ в воздухе.

Устаревшие лимиты выбросов, рассчитываются на основе ПДК, не отвечающих условиям Казахстана. Методика установления лимитов выбросов не учитывает возросшее влияние на загрязнение атмосферного воздуха комплекса источников выбросов, в том числе автотранспорта, частного сектора, канализационных сооружений и т.д. К тому же хаотичная застройка в г. Алматы привели к снижению средних скоростей ветра, нарушению направления потоков воздуха, соответственно значительному накоплению загрязняющих веществ в атмосфере и образованию едкого смога (Рисунок 1).

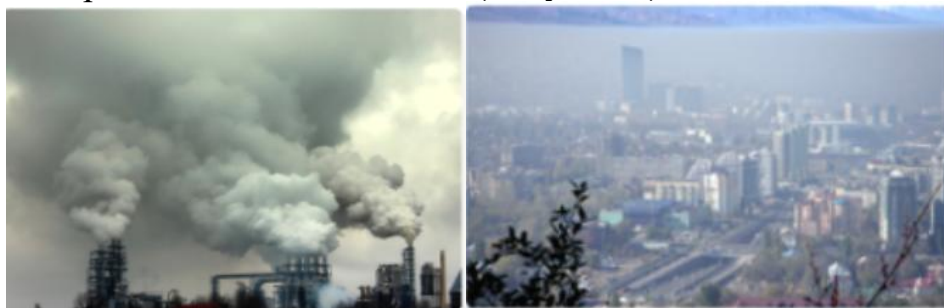


Рисунок 1- Выбросы загрязняющих веществ в атмосфере и образование едкого смога в г. Алматы

Методы исследования. Проведен анализ мониторинга за состоянием качества атмосферного воздуха. По результатам производственного экологического контроля воздействие на загрязнение атмосферного воздуха на границе санитарно-защитных зон промплощадки (1000м) и золоотвала (500м) не превышает установленные нормативы качества компонентов окружающей среды.

Анализ проведенных исследований показал перечень загрязняющих веществ, которые оказывают влияние на здоровье человека: оксид углерода, диоксид азота, диоксид серы, сероводород, озон, взвешенные частицы РМ-10, РМ-2,5, полиароматические углеводороды (ПАУ), летучие органические соединения (ЛОС), мышьяк, никель, свинец, кадмий.

Проблема отсутствия инвентаризации всех источников выбросов привело к невозможности их регулирования, а также разрозненность информации и невозможность ее целевого использования. Как следствие атмосферный воздух в значительной степени загрязняется бесконтрольными объемами выбросов загрязняющих веществ.

Таблица 1 - Уровень загрязнения воздуха по городу Алматы за 2020г. и 1 пг. 2021г.

Месяц	Уровень	Вещ-во	Пост
2020г.			
Январь	Высокий	Диоксид азота	пр. Аль-Фараби, угол ул. Навои, м-н Орбита, территория Дендропарка АО «Зеленстрой»
Февраль	Высокий	РМ-2,5	м-н «Шанырак», школа №26, ул. Жанкожа батыра, 202
		Диоксид азота	ул. Амангельды, угол ул. К.Сатпаева
Март	Высокий	РМ-2,5	м-н «Шанырак», школа №26, ул. Жанкожа батыра, 202
Апрель	Повышенный	РМ-2,5	м-н «Шанырак», школа №26, ул. Жанкожа батыра, 202
Май	Повышенный	РМ-2,5	Жетысуский район, территория Жетысуского акимата, микрорайон «Кулагер»
		Диоксид азота	пр. Райымбека, угол ул. Наурызбай батыра
Июнь	Повышенный	РМ-2,5	Акан Серы, 159Б район рощи Баума
		Диоксид азота	м-н Тастак-1, ул. Толе би, 249, ГУ «городская детская поликлиника №8»
Июль	Повышенный	Диоксид азота	ул. Амангельды, угол ул. К.Сатпаева
		Диоксид азота	м-н Аксай-3, ул. Маречка, угол ул. Б.Момышулы
Август	Высокий	Диоксид азота	Жетысуский район, терр. Жетысуского акимата, микрорайон «Кулагер»
Сентябрь	Повышенный	РМ-2,5	Карасу, 6-я, 122
		Диоксид азота	м-н Айнабулак-3
Октябрь	Повышенный	РМ-2,5	Бостандыкский район, терр. Казахского национального университета им. Аль-Фараби
		Диоксид азота	ул. Амангельды, угол ул. Сатпаева
Ноябрь	Высокий	РМ-2,5	Бостандыкский район, терр. Казахского национального университета им. Аль-Фараби
		Диоксид азота	Акан Серы, 159-Б район рощи Баума
Декабрь	Очень высокий	Диоксид азота	пр. Аль-Фараби, угол ул. Навои, м-н Орбита, территория Дендропарка АО «Зеленстрой»
2021г.			
Январь	Очень высокий	Диоксид азота	Алатауский район, ледовая арена «Алматы арена» по улице Б. Момышулы
Февраль	Высокий	РМ-2,5	м-н «Шанырак», школа №26, ул. Жанкожа батыра, 202
		Диоксид азота	Алатауский район, ледовая арена «Алматы арена» по улице Б. Момышулы
Март	Высокий	Диоксид азота	ул. Амангельды, угол ул. К. Сатпаева
Апрель	Высокий	Диоксид азота	ул. Амангельды, угол ул. К. Сатпаева
Май	Высокий	Диоксид азота	пр. Райымбека, угол ул. Наурызбай батыра
Июнь	Повышенный	Диоксид азота	пр. Райымбека, угол ул. Наурызбай батыра
		Диоксид серы	Алатауский район, ледовая арена «Алматы арена» по улице Б. Момышулы

Наибольшее количество превышений зафиксировано в районах м-н «Шанырак» (школа №26, ул. Жанкожа батыра, 202) и ледовая арена «Алматы арена» (по улице Момышулы).

Научные результаты. Оценка загрязнения атмосферного воздуха выполнена для следующих условий: при неблагоприятных метеоусловиях и опасной скорости ветра в диапазоне скоростей от 0,5 м/с до 3 м/с (U*); при

средней максимальной температуре наиболее жаркого месяца, при расчете максимальных концентраций, при среднегодовой температуре воздуха- при расчете годовых концентраций; координаты источников выбросов заданы в локальной системе координат с центром в месте размещения дымовой трубы № 1 ТЭЦ-3; безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания загрязняющих веществ в атмосфере для газообразных веществ и мелкодисперсных аэрозолей $F=1$, а для золы – 2; выбросами мелкодисперсных частиц PM 10 и PM 2,5.

Выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников в Алматинской области за 2021-2023 годы, тыс. тонн (Рисунок 2).

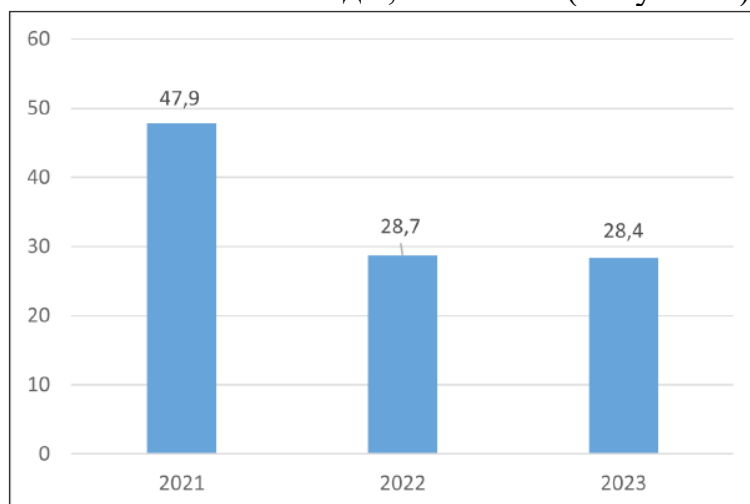


Рисунок 2 - Выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников в Алматинской области за 2021-2023 годы, тыс. тонн

Основными загрязняющими веществами атмосферного воздуха в Алматинской области являются сернистый ангидрид, окислы азота, твердые вещества и окись углерода (Рисунок 3)

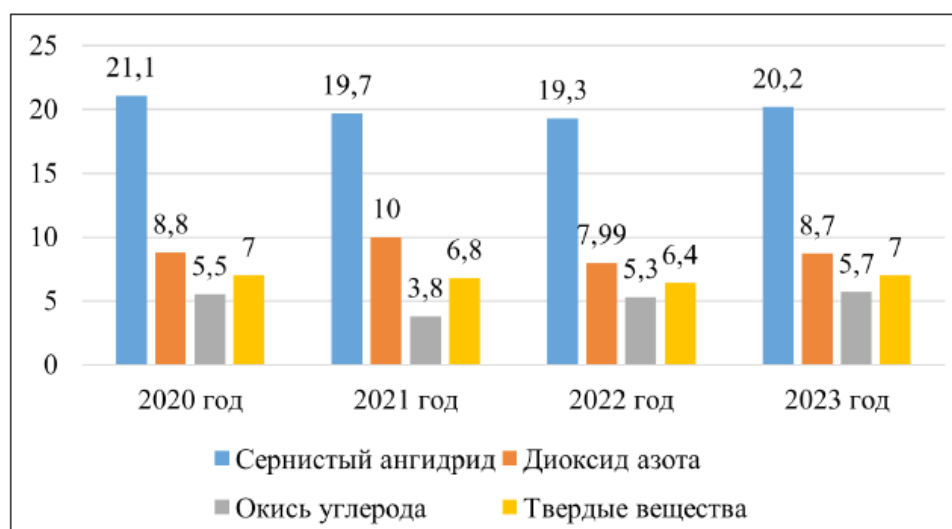


Рисунок 3 - Основные загрязняющие вещества атмосферного воздуха в Алматинской области

Выводы. Для улучшения экологического состояния окружающей среды, поддержание ландшафтного разнообразия территорий территории ТЭЦ 3 и санитарно-защитной зоны, необходимо совокупность работ, связанных с созданием и использованием растительных насаждений, саженцев деревьев хвойных пород, елей, сосен и другие, а также на золоотвале проводить работы по разработке защитного слоя, укреплению откосов с растительным грунтом с посевом трав, что приведет к ликвидации источников негативного воздействия на недра, снижению негативного влияния на природную среду.

Выполнение комплекса мероприятий по охране атмосферного воздуха будет способствовать сохранению процесса устойчивого развития и тех положительных изменений в экономической, социальной и экологической сферах, а также позволит соответствовать нормативам выбросов от котлов, установленных Техническим регламентом «Требования к эмиссиям в ОС при сжигании различных видов топлива в котельных установках тепловых электрических станций».

Список литературы:

1. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции: Для студентов вузов. 3-е изд., - М.: Энергоатомиздат, 2020.- 328 с.
2. Григорьев В. А., Зорин В. М. «Тепловые и атомные электрические станции», Москва, «Энергоатомиздат», 2019 г.
3. Жабо В.В. Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС. –М.: Энергоатомиздат, 1992
4. Рихтер Л.А., Волков Э.П. и др. Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов ТЭС. –М.: Энергоиздат, 1981 296с.
5. D. He, X. Fan and D. Chai, “On-line control strategy of fresh air to meet the requirement of IAQ in office buildings,” in Proc. IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications, Taichung, Taiwan, pp. 845-848, June 2010.
6. Сборник законодательных, нормативных и методических документов для экспертизы воздухо-охранных мероприятий. –А.: Гидрометеоиздат, 2024 –319 с

ФОСФОР ӨНЕРКӘСІБІНІҢ ҚОРШАҒАН ОРТАҒА ӘСЕРІ

Бейсекова Т.И.¹, Балабас Л.Х.², Шанбаев М.Ж.^{1*}

¹Г. Дәукеев атындағы Алматы энергетикалық және байланыс университеті,
Алматы қ., Қазақстан

²Ә.Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қарағанды қ., Қазақстан

e-mail.ru: t.beysekova@aes.kz, i.balabas@ktu.edu.kz, * m.shanbayev@aes.kz

Аңдатпа

Жамбыл облысында ЖШС «Қазфосфат» және ЖЖФЗ (Жаңа Жамбыл Фосфор зауыты) фосфор зауыттарының аумағында жинақталған химия өнеркәсібінің техногендік қалдықтарының көптігі – аталған өңірдің экологиялық жағдайына, атап айтқанда, ауданның қоршаған ортасына, ауа ортасының ластануына, сонымен қатар жерүсті және жерасты суларының сапасына теріс әсеріне байланысты өзекті мәселеге айналып отыр.

Сары фосфор мен оның қосындыларын өндіру - қоршаған ортаны зиянды заттармен ластау көздері болып табылады. Бұл өндіріс техногендік қалдықтардың - фосфор шлактарының, коттрельді шаңның және газ тәрізді қосылыстардың пайда болуымен сипатталады. Соңғы уақытта фосфор өндірісінің төмендеуіне қарамастан, қоршаған ортаның жай-күйі шиеленіскен күйінде қалып отыр. Осылайша, техногендік қалдықтарды өңдеуге бағытталған зерттеулердің үлкен экологиялық маңызы бар.

1. Кіріспе бөлім

Қазақстанда игерілуі әртүрлі қарқынмен жүргізіліп жатқан көптеген минералдық-шикізат ресурстары бар. Фосфорит кен орындарын игеру ерекше орын алады. Қаратау бассейні фосфор саласының дамуы үшін негізгі шикізат базасы болып табылады [1]. Фосфат шикізатының неғұрлым зерттелген кен орындары ретінде Жанатас, Шолақтау, Ақсай, Көксу және басқа да кен орындары жатады, яғни республикадағы фосфор концентратын, фосфор ұнын, фосфорсыз фосфаттарды жалғыз өндірушісі болып табылады.

«Қазфосфат» ЖШС Қазақстан Республикасының фосфор өнеркәсібін дамыта отырып, ТМД елдері аумағында құрамында фосфор бар өнімдерін өндіру бойынша көшбасшы компания болды [2]. Сондай-ақ, қазіргі таңда Қазақстан сары фосфорды экспорттаушы елдердің ішінде көшбасшы елдердің қатарында. 2020 жылы әлемдік экспорт бойынша Қазақстан Республикасы екінші орынды иеленген (ҚР үлесінде 38,2% тиесілі), бірінші орында – Вьетнам [3].

Өндіріс орнының негізгі қалдықтары фосфорлы шлактар (1а-сурет) мен кальций сульфатының фосфодигидраты (фосфогипс дигидраты) (1б-сурет) болып табылады. Фосфор қалдықтары, фосфорды электр пештерінде айдау

кезінде түйіршіктелген шлактарға [4], ал кальций сульфатының фосфодигидраты (фосфогипс дигидраты) фосфор қышқылын өндіру кезінде түзіледі және өнеркәсіптің неғұрлым ірі тонналық қалдықтарының бірі болып табылады. Үйінділердегі техногендік қалдықтардың қазіргі таңдағы көлемі мынадай [5]:

- ТФШ (түйіршіктелген фосфорлы шлагы) – 8,5 млн. т.;
- Фосфогипс – 10-12 млн. т.;

Кәсіпорындардың көпшілігі аз және қалдықсыз технологиялар жасауға ұмтылатынына қарамастан, практикада пайдалы өнімнің 1 тоннасына бірнеше тонна техногендік қалдықтар түзеледі [6]. Мысалы, фосфор қышқылын алу кезінде 1 тонна қышқылға 4-5 тонна фосфодигидрат кальций сульфаты (фосфогипс дигидрат) алынады. Тереңдігі 10 м, биіктігі 30 м болатын үйіндіде қазіргі таңда бірнеше млн. тонна фосфогипс қалдығы жинақталған, ал оның алып жатқан жер көлемі 96 га. Жаңа Жамбыл фосфор зауытында 1 тонна фосфор алу кезінде 10-12 тонна шлак бөлінеді [7]. Қазіргі уақытта техногендік қалдықтардың едәуір мөлшері үйінділерде жинақталған және оларды тасымалдау мен сақтау қажеттілігі кәсіпорындарды пайдалануды едәуір қиындатады және тіпті санитарлық қадағалау органдарының барлық талаптарын сақтаған күнде де оған іргелес аумақтың санитарлық жағдайы мен экологиялық жағдайын нашарлатады. Көп жағдайда үйінділер жасау үшін өндіріс орнының жер учаскесінің үлкен бөлігін иеліктен айыру қажет, бұл алаңдар кәсіпорынның өнеркәсіп аумағының көлемінен де асып кетеді.



Фосфорлы шлак



Фосфогипс

Сурет 1. - Фосфорлы шлак пен фосфогипстің сыртқы көрінісі

Антропогендік әсерге (ластануға) ұшыраған ортаның негізгі элементтері мыналар болып табылады: атмосфералық ауа, жерасты және жерүсті сулары, топырақ, өсімдіктер. Олардың жай-күйі, қаралып отырған аумақта экожүйені

қалыптастыру үшін де, іргелес аумақта тұратын халықтың денсаулығы үшін де маңызды [8].

Түйіршіктелген шлак - қауіптіліктің V сыныбына жататын, суда ерімейтін, тек 10% сілтінің ерітіндісімен сілтіленетін аморфты, шыны тәрізді зат. Алайда, түйіршіктелген шлак пен фосфогипс ашық алаңда сақталған кезде қоршаған ортаға әсер етеді [9].

Түйіршіктелген шлак пен фосфогипс үйінділері орналасқан ауданда ауа ортасының ластануын талдау жалпы қала бойынша 13 көрсеткішке дейін анықталады: 1) өлшенген бөлшектер (шаң); 2) күкірт диоксиді; 3) көміртек оксиді; 4) азот диоксиді; 5) азот оксиді; 6) фторлы сутегі; 7) формальдегид; 8) күкіртті сутек; 9) бенз(а)пирен; 10) марганец; 11) қорғасын; 12) кобальт; 13) кадмий.

Бақылау нәтижесінде алынған нақты материал 2024 жылдың қаңтар айындағы әуе бассейні жай-күйінің өзгеру серпінін қадағалауға мүмкіндік береді. Стационарлық бақылау желісінің деректері бойынша атмосфералық ауаның ластану деңгейі жоғары деп сипатталады, ол көміртек оксиді бойынша СИ = 2,0 (жоғары) және аудандағы күкірт сутегі бойынша КҚ (НП) = 2,4% (жоғары) мәнімен айқындалды.

Атмосфералық ауаның ластануына негізгі үлесті күкіртті сутек қосады (қаңтар айындағы ШРК жоғарылау саны: 54 жағдай).

Көміртек оксидінің максималды бір реттік шоғырлануы ШРК_{м.б.р.} 2,0, күкіртті сутегі ШРК_{м.б.р.} 1,7, өлшенген заттар (шаң) ШРК_{м.б.р.} 1,0, атмосфералық ауадағы басқа ластанушы заттар мен ауыр металдардың шоғырлануы ШРК-дан аспаған.

Орта тәуліктік нормативтер бойынша жоғарылау азот диоксидіне тиесілі, ШРШ_{о.т.} 1,5 екені байқалды.

Экстремальды жоғары және жоғары ластану жағдайлары (ЭЖЛ және ЖЛ) бойынша: ЖЛ (10 ШРК астам) және ЭЖЛ (50 ШРК астам) жағдайлары тіркелмеген.

Нақты мәндері, сондай-ақ сапа нормативтерінің жоғарылау еселігі және жоғарылау жағдайларының саны 1-кестеде көрсетілген. Қоршаған орта, адам, жануарлар мен өсімдіктер организмдеріне теріс әсер ететін шығарындыларды түзуші негізгі көздердің бірі - фосфор өндірісінің өнеркәсіптік шығарындылары болып табылады [10].

Соңғы бес жылда атмосфералық ауаның ластану деңгейінің өзгеруі 2-суретте көрсетілген.

Диаграммада атмосфералық ауаның ластану деңгейі жоғары деп бағаланатыны көрінеді.

Максималды бір реттік ШРК жоғарылау саны күкірт сутегі бойынша (54 жағдай), көміртек оксиді бойынша (19 жағдай) белгіленді. Орта тәуліктік шоғырлану нормативтерінің жоғарылауы азот диоксиді бойынша байқалды.

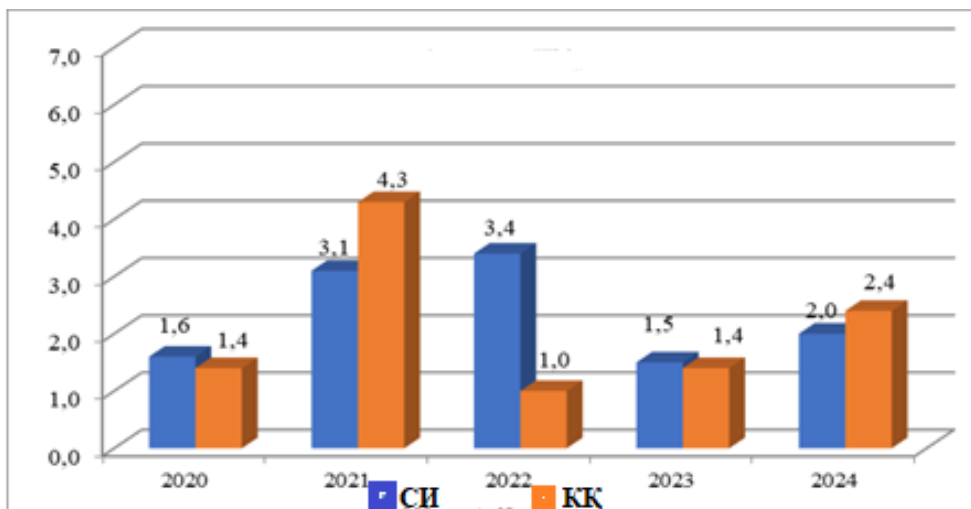
Ауаның ластануына, яғни, азот диоксидінің орта тәуліктік көрсеткіштерінің ұлғаюына қаладағы автокөліктер мен қатты отынды жағу да өз үлесін

қосатынын, ал күкіртті сутектің адам мен жануарлардың тіршілік ету кезіндегі пайда болатын қалдықтардың бактериялық ыдырауы кезінде, тазарту құрылыстары мен қоқыс жәшіктерінде, ақуыздар ыдыраған кезде, кәріздердегі газ қоспасының құрамынан пайда болатынын да атап өткен жөн.

Кесте - 1. Атмосфералық ауаның ластану сипаттамасы, 2024 жыл

Атауы	Орташа концентрация		Максималды бір-КҚ реттік концентрация			ШРК _{м.б.р.} жоғарылау жағдайларының саны		
	мг/м ³	ШРК _{о.т.}	мг/м ³	ШРК _{м.б.р.}	%	> ШРК	>5 ШРК	>10 ШРК
							Оның ішінде	
Өлшенген заттар (шаң)	0,12	0,83	0,5	1,00	0,00	0	0	0
Күкірт диоксиді	0,011	0,22	0,150	0,30	0,00	0	0	0
Көміртек оксиді	1,1	0,36	10,0	2,01	0,75	19	0	0
Азот диоксиді	0,06	1,53	0,16	0,80	0,00	0	0	0
Азот оксиді	0,04	0,70	0,11	0,28	0,00	0	0	0
Фторлы сутек	0,001	0,23	0,006	0,30	0,00	0	0	0
Формальдегид	0,006	0,64	0,041	0,82	0,00	0	0	0
Күкіртті сутек	0,002		0,014	1,73	2,42	54	0	0
Бенз(а)пирен	0,00023	0,23	0,0005					
Қорғасын	0,000009	0,029	0,000012					
Марганец	0,000033	0,033	0,000096					

Өндірістердің шығарындылары қоршаған ортаға теріс әсер етеді, осы өңірде қалыптасқан экологиялық байланыстарды бұзады. Көп тонналы қатты қалдықтар қоршаған ортаға, оның ішінде жерүсті және жерасты суларының сапасына теріс әсер етеді [11].



Сурет 2. - СИ пен КҚ салыстыру, 2020-2024 жылдар

Минералданған сулардың ластануы ең үлкен проблема болып табылады, өйткені жерасты суларының әртүрлі тұздармен ластануы нормативтерден 3-4 есе асады. Жер ресурстарының жай-күйіне әсері бойынша жерді қалпына келтіру үшін фосфор өндірісінің қалдықтарын пайдаланудың мүмкін еместігі көрсетілген, өйткені қалдықтардың құрамында уранның, фосфордың радиоактивті қосылыстары бар, олар топырақты ластап қана қоймай, сондай-ақ биосферадағы тірі заттар жүйесінің алмасу тетігін бұзады. Фосфат шикізатын қайта өңдеудің негізгі проблемасы фтор фосфинінің, ауыр металдардың зиянды әсері болып табылады [12].

Жамбыл облысы бойынша жер үсті суларының сапасын бақылау 6 су объектісінің (Шу, Талас, Асса, Ақсу, Қарабалта, Тоқташ өзендері) жүргізілді. Бақылау нәтижелері 2-кестеде келтірілген [10].

Алынатын су сынамаларында жер үсті суларын зерттеу кезінде сапаның 31 физикалық-химиялық көрсеткіші анықталады: визуалды байқау, су шығыны, су температурасы, сутегі көрсеткіші, мөлдірлік, ерітілген оттегі, өлшенген заттар, ОБТ₅, ОХТ, тұзды құрамның басты иондары, биогендік элементтер, органикалық заттар (мұнай өнімдері, фенолдар), ауыр металдар.

Қазақстан Республикасының су объектілеріндегі су сапасын бағалау үшін негізгі нормативтік құжат «Су объектілеріндегі су сапасын жіктеудің бірыңғай жүйесі» болып табылады.

Кестеде көрсетілгендей, 2023 жылдың қаңтар айымен салыстырғанда 2024 жылы Ассы өзені 3-кластан 4-класқа ауысқан, яғни, нашарлаған.

Жамбыл облысының аумағындағы су объектілеріндегі негізгі ластаушы заттар магний, сульфаттар және ХПК болып табылады.

Жармалар бөлінісіндегі су объектілерінің сапасы жөніндегі ақпарат 2-кестеде көрсетілген.

Кесте – 2. Жер үсті суларының сапасын бақылау нәтижелері

Су объектісінің атауы	Су сапасының класы		Параметрлер	Өлшем бірлік	Концентрация
	2023 жылдың қаңтар айы	2024 жылдың қаңтар айы			
ө.Талас	нормаланбайды (>5 класс)	3 класс	Магний	мг/дм ³	29,45
ө. Ассы	3 класс	4 класс	ОХТ	мг/дм ³	33,35
ө.Шу	4 класс	3 класс	Магний	мг/дм ³	22,05
ө. Ақсу	4 класс	4 класс	Магний	мг/дм ³	42,2
ө.Қарабалта	4 класс	4 класс	Магний	мг/дм ³	44,1
			Сульфаттар	мг/дм ³	407,0
ө. Тоқташ	нормаланбайды (>5 класс)	4 класс	Магний	мг/дм ³	42,2
* - осы кластағы заттар нормаланбайды					

Топырақ пен өсімдіктерде макро және микроэлементтердің жоғары болуы, ортаның қышқылдануы, топырақ пен өсімдіктердің техногендік бұзылуы комбинаттың күшті әсер ету аймағындағы табиғи-аумақтық кешендердің барынша өзгеруі туралы айтуға мүмкіндік береді. Өнеркәсіптің ықпалымен биоценодикалық жүйелер өсімдіктер мен жануарлардың өмірі үшін қолайсыз қасиеттерге ие жаңа техногендік ландшафттарға ауыстырылуы мүмкін. Топырақ сынамаларының химиялық талдау нәтижелері 3-кестеде келтірілген [13].

Келтірілген деректерді талдау зерттелетін уақыт кезеңіне фтор, мышьяк, қорғасын құрамының жоғары болуы тән екенін көрсетеді. Өсімдіктер мен азықтарда фтордың артық жиналуы жануарлардың флюорозға шалдығуына әкелуі мүмкін, олардың белгілері тіс кемістіктерін, буындардың зақымдануын, сүйектердің сынуын, хромотаны қамтиды. Жануарлар тәбетін жоғалтады. Стронций, кадмий, қорғасын адам мен жануарлардың организмдерінде жоғары уыттылыққа және қауіпті жинақталуға ие. Топырақтағы ластаушы заттарды анықтау нәтижелері жыл сайын олардың саны өсіп отырғанын көрсетеді, бұл фосфорлы қалдықтардың жиналуымен байланыстырылады.

Кесте - 3. Топырақ сынамаларының химиялық талдау нәтижелері

Атауы	Концентрациясы, мг/кг	ШРК, мг/кг
Фтор	4,8	2,8
Қорғасын	41,4	32
Мышьяк	3,1	2

Элементтердің таралуын кешенді зерттеу - топырақ бойынша (неғұрлым егжей-тегжейлі) және қар бойынша (неғұрлым дәрежі) ластану шекті заңдылықтарды анықтауға мүмкіндік берді. Бірқатар химиялық элементтер минералдық тыңайтқыштар зауытының айналасында айқын ореолдар құрайды.

Қалдықтарды жинақтау лимиттері және қалдықтарды көму лимиттері қоршаған ортаны қорғауды және адамның өмірі мен (немесе) денсаулығы үшін қолайлы жағдайларды қамтамасыз ету, көмуге жататын қалдықтардың санын азайту және оларды қайта пайдалануға, қайта өңдеуге және кәдеге жаратуға дайындауды ынталандыру мақсатында белгіленеді. Қалдықтардың жинақталу лимиттерін және қалдықтарды көму лимиттерін I және II санаттағы объектілердің операторлары экологиялық рұқсат алған кезде қалдықтарды басқару бағдарламасында негіздейді және тиісті экологиялық рұқсатта белгілейді. Қалдықтарды жинауға Қазақстан Республикасы заңнамасының талаптарына сәйкес арнайы орнатылған және жабдықталған орындарда ғана (алаңдарда, қоймаларда, қоймаларда, контейнерлерде және өзге де сақтау объектілерінде) рұқсат етіледі. Дегенмен, 4а, 4б суреттерден Тараз қаласындағы фосфор өндірісінің өндірістік қалдықтарының жинақталған орнын көре аламыз. Шикізат материалдары ретінде өндірістік қалдықтар мен жанама өнімдерді кешенді пайдаланудың маңыздылығы, біріншіден, үйінділер алып жатқан бағалы жер алқаптарын босата отырып, қоршаған ортаны қорғау жөніндегі міндеттерді

шешумен айқындалады. Екіншіден, өндіріс қалдықтары басқа салалардың шикізатқа қажеттілігін едәуір дәрежеде жабады. Үшіншіден, шикізатты кешенді пайдалану кезінде өнім бірлігіне үлестік шығындар төмендейді және олардың өтелу мерзімі азаяды, сондай-ақ қалдықтарды жинауға, олар үшін қоймаларды салуға және пайдалануға байланысты негізгі өнеркәсіптің өндірістік емес шығындары төмендейді және қалдықтардың технологиялық дайындығы есебінен жаңа өнімге жұмсалатын шығындар, жылу мен электр энергиясының шығыны азаяды [14].



Сурет 4а – «Казфосфат» Тыңайтқыш зауытындағы қалдық үйіндісі



Сурет 4б – Жаңа Жамбыл фосфор зауытының қалдық үйіндісі

Қорытынды

Мониторингтік зерттеулер көрсеткендей, фосфор өнеркәсібінің көп тонналы қатты қалдықтары орналасқан ауданның ауа ортасының ластануына, топырақ пен жерүсті және жерасты суларының сапасына теріс әсер етеді. Ауа құрамы мен топырақтағы зиянды заттардың шамадан тыс көптігі осының дәлелі. Минералданған сулардың ластануы ең үлкен проблема болып табылады, өйткені оларда фосфор және фторлы қосылыстар бар және жер асты суларының осы тұздармен ластануы нормативтерден бірнеше есе асады. Сондықтан зауыт үйінділерінде жинақталған өндіріс қалдықтарын ұтымды пайдалану жолдарын қарастыру және оларды қайта кәдеге жарату бағыттарын әзірлеу маңызды болып табылады.

Әдебиеттер тізімі

1. Райымбеков Е.Б. Докторская диссертация на тему «Разработка технологии обогащения некондиционного сырья и отходов фосфорной отрасли Республики Казахстан». Шымкент, - 2022.
2. Жугинисов М.Т. Рациональная переработка отходов производства и местного сырья южного региона Казахстана. Докторская диссертация. – Тараз, 1999. – 49 с.
3. Тыңайтқыштар нарығын талдау: фосфор // QazTrade сауда саясатын дамыту орталығы <https://qaztrade.org.kz/wp-content/uploads/2022/08/analiz-po-udobreniyam.pdf>
4. [А.А. Шолак](#), [А.Н. Нурлыбаева](#), [Ж.А. Абдуллаева](#), [А.М. Алибаева](#). Микроскопический и рентгеноструктурный анализ фосфогипса //Вестник Казахстанско-Британского технического университета. – 2020, Том 17, №2. – С.152-155.
5. №757.МОН.ГФ.15.РИПР.29 «Разработка технологии производства вяжущих и дорожных смесей из отходов фосфорной промышленности». Отчет по НИР (заключительный). НЦ НТИ: рук. Тургумбаева Х.Х. - Алматы: КазННТУ. - 2017. – 109 с.
6. Yanhai Wang, Rui Xiao, Wei Hu, Xi Jiang, Xiao Zhang, Baoshan Huan. Effect of granulated phosphorus slag on physical, mechanical and microstructural characteristics of Class F fly ash based geopolymers. [Construction and Building Materials. Volume 291](#), 12 July 2021.
7. Тургумбаева Х.Х., Лапшина И.З., Тургумбаева Р.Х., Кадыржанова Ж.Б., Леспек Д.Т. Эколого-экономическая оценка отходов фосфорной промышленности. Труды международной научной конференции «Высокой технологии – залог устойчивого развития». – Алматы, - 2011.
8. Раздел охраны окружающей среды к рабочему проекту ЗМУ ТОО «Казфосфат» в городе Тараз. ТОО «КЭСО Отан - Тараз», Тараз 2022. -С. 92.
9. А. А. Айтимбетова, Р. А. Исаева, Н. К. Жорабаева, К. Рахмет, А. Жанибеков. Влияние отходов фосфорного производства на окружающую среду и способы снижения его негативного воздействия. Сахаровские чтения 2020 года: экологические проблемы XXI века материалы 20-й международной научной конференции ЭБ БГУ: Межотраслевые проблемы: Охрана окружающей среды. Экология человека. - 2020. – Ч. 2. – С. 339-342.
10. Информационный бюллетень о состоянии окружающей среды Жамбылской области. Министерство экологии и природных ресурсов РК Филиал РГП «Казгидромет» по Жамбылской области. 2024 январь, С. 19.
11. Тургумбаева Р.Х., Абдикаримов М.Н., Тургумбаева Х.Х. Специфические особенности взаимодействия промышленного предприятия с окружающей средой. Промышленность Казахстана. – Алматы, - 2003. - № 5 (20). – С.56-57.
12. А.К. Толешов, Х.Х. Тургумбаева, И.З. Лапшина, Т.И. Бейсекова, Ж.У. Абдуалиева, А.Ш. Жанпейсова, А.С. Жаржанова. [Экологическая оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха в зоне размещения отвалов завода](#)

Минеральных Удобрений ТОО "Казфосфат". Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. 100 лет отечественного проектирования металлургических печей. – 2016, С. 380-388.

13. СанПиН 42-128-4433-87 «Санитарные нормы допустимых концентраций (ПДК) химических веществ в почве».

14. Shilin Yang, Kateryna Krayushkina, Oleksandra Akmalidina, Junwen Ji, Andrii Bieliatynskyi. Determination of the possibility of using phosphorus slag in the road industry. Materials Science-Poland. - 2023, 41(3), pp. 44-61.

ӘОЖ 504.3.054

ЖЭО-1 ШЫҒАРЫНДЫЛАРЫНЫҢ АЛМАТЫ ҚАЛАСЫНЫҢ АУА САПАСЫНА ӘСЕРІ ЖӘНЕ ОНЫ ТӨМЕНДЕТУ ШАРАЛАРЫ

Шәріпзада А.А., Бегимбетова А.С.

Ғ.Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,

Алматы қ., Қазақстан

*e-mail: ai.sharipzada@aes.kz

1 Кіріспе

Дүниежүзілік банктің «Қазақстандағы ауа сапасын басқару» атты есебінде Алматы қаласы республикадағы ең жоғары ластану деңгейі тіркелген мегаполистердің бірі ретінде атап өтілген. Зерттеу нәтижелері бойынша, қаладағы ауа сапасының нашарлауына ең алдымен жылу энергетикасы кәсіпорындарының, соның ішінде ЖЭО-1-дің шығарындылары себеп болып отыр. Атмосфераға бөлінетін зиянды заттар қатарында PM_{2.5}, PM₁₀, азот оксидтері және көмірқышқыл газы негізгі орын алады. Бұлардың шекті мөлшерден артық жиналуы тыныс алу аурулары мен жүрек-қан тамыр жүйесі ауруларының өсуіне әкеліп соғады [1].

2 Зерттеудің мақсаты

ЖЭО-1 шығарындыларының Алматы қаласының ауа сапасына әсерін талдау және оны төмендету жөнінде ұсыныстар әзірлеу. Зерттеу барысында Қазақстан Республикасының Экология және табиғи ресурстар министрлігінің 2023–2025 жылдардағы ресми статистикалық деректері сондай-ақ Алматы қаласы бойынша атмосфералық мониторинг станцияларынан алынған мәліметтер пайдаланылды [2]. түрінде көрсетілді. Бақыланатын ластаушы заттар мыналар: көміртек оксиді, азот оксиді мен диоксиді, күкірт диоксиді, бейорганикалық шаң. Бақылау жүргізу кезінде келесі параметрлер анықталады:

- газ-ауа қоспасының шығу жылдамдығы;
- газ-ауа қоспасының көлемі (жай, қалыпты, құрғақ);

- газ-ауа қоспасының температурасы;
- газ-ауа қоспасындағы O_2 мөлшері;
- газ-ауа қоспасындағы (ГАК) зиянды заттардың концентрациясы.

Аспаптық өлшеулердің нәтижелері белгіленген шығарындылар нормативтерімен салыстырылады. Қысқы маусымда инверсия құбылысының әсерінен бұл зиянды қоспалар қала ішінде жинақталып, халық денсаулығына айтарлықтай қауіп төндіреді. Жылу электр орталықтарынан шығатын ластаушы заттар кері әсер беруде.

Мәселен, қазандық № 0002 үшін шығарындылардың құрамы бойынша кесте берілген:

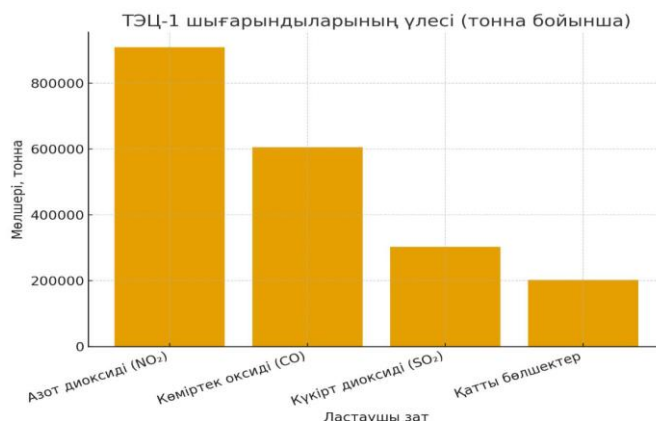
1-кесте. Қазандықтан шығатын ластаушы заттардың нормативі.

№	Өндіріс, цех	Бақыланатын зат	Бақылау кезеңділігі	Шығарынды нормативі, т/с	ШРК мг/м ³	Бақылауды жүзеге асыратындар
0002	Қазандық цех	Азот диоксиді	Тоқсанда 1 рет	38.0065568	272.8551	Зертхана
		Азот оксиді		6.17606548	44.33896	
		Күкірт диоксиді		79.7660456	572.6536	
		Көміртек оксиді		6.9702	50.04018	

Сонымен қатар газ отыны жанған кезде түзілетін негізгі өнім – көмірқышқыл газы мен су буы. Сондықтан газбен жұмыс істейтін ЖЭО-нің басты экологиялық әсері – парниктік газдардың шығарындылары болып табылады [3].

3 Алынған нәтижелер және оларды талқылау

QAig бойынша Алматы – 2025 жылы ауа сапасы бойынша ең қауіпті индекстің ең жоғарғысы болып табылады [4]. Оған жылу электр орталықтарының әсері де біршама болып табылады. Ластаушы заттардың шығарындысы график түрінде көрсетілді.



Сурет 1 – ЖЭО-1 шығарындыларының динамикасы (2023–2024 жж.)

Сонымен қатар, азот оксидтерінің түзілуі – жоғары температурада жану барысында азот оксидтері түзіледі. Бұл заттар атмосферада фотохимиялық реакцияларға қатысып, түтін мен қышқыл жаңбырдың пайда болуына себеп [5]. Отынды жағу барысында Алматыдағы ЖЭО-1 мұржаларынан атмосфералық ауаға көміртек оксиді, азот оксиді мен диоксиді және бенз(а)пирен бөлінеді, ал қазандықтарды жағу үшін мазут қолданылған кезде мазутты күл (ванадийге шаққанда) және күкірт диоксиді түзіледі.

Газды тазалау қондырғыларының атауы, түрлері және шығарындыларды төмендету тәсілдеріне: екінші буындық батареялы эмульгатор қолданылады. Бұл жабдық күкірт диоксиді мен жылу электр станцияларындағы мазуттан шыққан күлді залалсыздандыру үшін пайдаланылады. Негізгі жанармай – табиғи газ, қосалқы жанармай – мазут [6]. Әр үлкен салаларда техникалық жабдықтар мен құрылғылар шығарындылардың пайда болуына тығыз байланысты. Бұл мақаладағы басты ластаушы көздер - қазандықтардан шыққан түтін газдарын шығару үшін пайдаланылатын төрт түтін құбыры. Ірі қалалардың үстінде атмосфераға 10 есе көп аэрозольдер және 25 есе көп газдар бөлінеді [7].

Шығарындыларды азайту үшін келесі шараларды жүзеге асыру ұсынылады:

- газды терең тазалау технологияларын енгізу – азот оксидтерін ұстап қалатын каталитикалық нейтрализаторлар орнату [8].

- энергетика саласын жаңғырту – ескі қазандық қондырғыларын заманауи газ генераторларына алмастыру

- фильтрлер мен нейтрализаторларды орнату арқылы азот және күкірт оксидтерінің концентрациясын азайту

- технологиялық норматив – кешенді экологиялық рұқсатта эмиссиялар көлемінің бірлігіндегі маркерлік ластағыш заттардың шекті саны (массасы); уақыт бірлігіне немесе өндірілетін өнімнің (тауардың), орындалатын жұмыстың, көрсетілетін қызметтің бірлігіне есептелетін электр және (немесе) жылу энергиясының, өзге ресурстардың тұтынылу мөлшері түрінде белгіленетін экологиялық нормативтер ұсталуы керек [9].

- өндірістік мониторингтің кезеңділігі мен ұзақтығы, өлшеулер жүргізу жиілігі

- технологиялық процесті қадағалау және апаттық жағдайлардың алдын алу,

Бұл шаралар ауа сапасын жақсартып, қала тұрғындарының денсаулығына оң әсер етеді. Қоршаған ортаны қорғау саласында нормативтік-құқықтық құжаттар экологиялық қауіпсіздікті қамтамасыз етудің негізгі құралдарының бірі болып табылады. Бұл құжаттар табиғи ресурстарды тиімді пайдалану, атмосфералық ауаның, судың, топырақтың ластануын шектеу, қалдықтарды басқару және биологиялық әртүрлілікті сақтау бойынша талаптар мен ережелерді белгілейді. Қазақстан Республикасында экологиялық қызметті реттейтін негізгі құжаттардың қатарына «ҚР Экологиялық кодексі», санитарлық-гигиеналық нормалар, мемлекеттік экологиялық стандарттар және рұқсат беру жүйесін реттейтін нормативтер жатады. Бұл құжаттар өнеркәсіптік кәсіпорындардың, соның ішінде жылу энергетикасы нысандарының (ЖЭО) қоршаған ортаға әсерін

бағалау мен бақылау үдерісінде маңызды рөл атқарады. Нормативтік құжаттар кәсіпорындардың зиянды заттарды атмосфераға, су қоймаларына және топыраққа шығаруы бойынша шекті рұқсат етілген концентрацияларды (ШРК) белгілеп, экологиялық мониторинг жүргізу міндеттерін нақтылайды. Сонымен қатар, олар табиғат пайдаланушылардың жауапкершілігін арттырып, өндірістік процестердің экологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз етуге бағытталған [10].

4 Қорытынды

Алматы қаласының экологиялық жағдайына ЖЭО-1 шығарындылары әсер ететіні анықталды. Газды қолдану нәтижесінде ауаға азот диоксиді, көміртек оксиді, күкірт диоксиді және қатты бөлшектер бөлінеді. Бұл заттар атмосфералық ауаны ластап қана қоймай, халықтың денсаулығына, әсіресе тыныс алу жүйесіне зиян келтіреді, сондай-ақ қалада жиі байқалатын түтін құбылысының негізгі себептерінің бірі болып табылады.

ЖЭО – қаланың энергетикалық қауіпсіздігін қамтамасыз ететін негізгі нысан. Алайда оның атмосфераға тигізетін әсері айтарлықтай. Сондықтан өндіріс тиімділігін арттыра отырып, зиянды шығарындыларды азайту бойынша шаралар қабылдау қажет.

Ауаның сапасын жақсарту үшін кешенді шаралар қажет. Олардың ішінде түтін газдарын тазалау жүйелерін жетілдіру, қондырғыларды жаңғырту. Сонымен қатар, тұрақты мониторинг жүргізу және заңнамалық талаптарды күшейту де тиімді нәтиже береді. Осылайша, ЖЭО-1 шығарындыларын азайту – Алматы қаласының экологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз етудің, тұрғындардың денсаулығын сақтаудың және өмір сапасын арттырудың негізгі жолдарының бірі болып табылады.

Алматы қаласының географиялық ерекшеліктері де жағдайды күрделендіреді. Қала таулармен қоршалғандықтан, атмосферадағы ластаушы заттар төменгі қабатта ұзақ сақталып, желдетілу процесі баяу жүреді. Бұл құбылыс қыста жиі байқалатын түтін мәселесін күшейтеді. Станция жұмысының экологиялық әсері тек ауа сапасымен шектелмейді. Жылу энергиясын өндіру кезінде пайдаланылатын судың үлкен көлемі жергілікті экожүйеге жүктеме түсіреді. Сонымен қатар, жабдықтардың ескіруі апатты жағдайлардың туындау қаупін арттырады.

ЖЭО-1 Алматы қаласын жылумен қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарғанымен, оның экологиялық әсері – атмосфераның ластануы, су ресурстарына түсетін жүктеме және тұрғындардың денсаулығына тигізетін қауіп – өзекті мәселе болып қала береді. Осыған байланысты станцияда заманауи сүзгілерді енгізу, толықтай газға көшу және экологиялық менеджмент жүйесін жетілдіру қажет. Алматыда соңғы жылдары аллергиялық және өкпе ауруларының өсуі белгілі бір дәрежеде жылу электр орталықтарының шығарындыларымен байланысты.

Әдебиет тізімі:

- [1] Қазақстандағы ауа сапасын басқару: саясат пен институционалдық бағалау - 2020 ж.
- [2] «Қазақстан Республикасындағы қоршаған ортаның жай-күйі мен табиғи ресурстарды пайдалану туралы ұлттық есеп – 2021 ж.
- [3] О. К. Токовой., «Инженерлерге арналған экология», 2015 ж.–24 б.
- [4] Халықаралық ұйымдар (IQAir) бойынша Алматының 2025 жылғы ауа сапасы рейтингі – QazaqGreen.
- [5] В. А. Мунц, Е. Ю. Павлюк, А. С. Прошин., «Қазандық қондырғылары мен бу генераторлары», 2020 ж.
- [6] «Алматы ЖЭО-1-ді кеңейту (200-250 мвт қуаттығы бар пгу құрылысы) қысқаша техникалық емес түйіндеме» 2020 ж. – 15 б.
- [7] В.А. Горбанёв, Б.И. Кочуров., «Өзгеріп жатқан әлемдегі қоршаған орта», 2020 ж. – 188 б.
- [8] Баймұханбетова А.Т., Жанабаева А.Б. ЖЭО шығарындыларының Алматы қаласының атмосфералық ауасына әсері. – ҚазҰУ Хабаршысы. Экология сериясы, 2022 ж.
- [9] «Атмосфералық ауаға жол берілетін антропогендік әсер етудің нормативтерін айқындау» Қазақстан Республикасы Экология, геология және табиғи ресурстар министрінің 2021 жылғы 14 қыркүйектегі № 375 бұйрығы
- [10] «Экология кодексі» Қазақстан Республикасының 2021 жылғы 2 қаңтардағы № 400-VI ҚРЗ Кодексі.

ӘОЖ 504.5

ӨНЕРКӘСІПТІК КӘСІПОРЫНДАР МЕН АВТОМОБИЛЬ ЖОЛДАРЫНЫҢ ӘСЕР ЕТУ АЙМАҒЫНДАҒЫ АУА ОРТАСЫНЫҢ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ҚАУІПСІЗДІГІН БАҒАЛАУ

Шыңғыс А.Ә.

Ғ.Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан

* e-mail: Al.shynggys@aes.kz

Кіріспе

Қазіргі таңда атмосфералық ауаның сапасы қала тұрғындарының денсаулығы мен өмір сүру сапасына тікелей әсер ететін маңызды экологиялық факторлардың бірі болып отыр. Әсіресе ірі мегаполис саналатын Алматы қаласында бұл мәселе айрықша өзекті. Қалада көлік құралдарының саны жылдан-жылға артып келеді, соның ішінде Әл-Фараби даңғылы сияқты ірі магистральдардағы көлік ағынының қарқындылығы ауа сапасының төмендеуіне

негізгі себептердің бірі болып отыр. Сонымен қатар өнеркәсіптік кәсіпорындардың әсері де атмосфераға түсетін жүктемені күшейтуде.

Алматының географиялық орналасуы – тау етегінде ойыс жерде орналасуы – ластаушы заттардың ауада жиналуына ықпал етіп, жағымсыз метеорологиялық жағдай туындатады. Сондықтан ауаның сапасын бақылаудың тиімді әрі заманауи әдістерін енгізу қажеттілігі туындап отыр.

Стационарлық бақылау станцияларының мүмкіндігі шектеулі болғандықтан, қазіргі заманда дронға орнатылған ауа сапасын өлшейтін құрылғыларды пайдалану өзекті шешім болып табылады. Бұл әдіс ауаның ластану деңгейін кеңістіктік және биіктік тұрғыда жан-жақты бағалауға мүмкіндік беріп, нақты уақыт режимінде мәлімет алуға жағдай жасайды.

Зерттеу мақсаты мен міндеттері

Зерттеу мақсаты: Өнеркәсіптік кәсіпорындар мен автомобиль жолдарының әсер ету аймағында дронға орнатылған ауа сапасын өлшейтін құрылғыны пайдалана отырып, атмосфералық ауаның экологиялық қауіпсіздігін бағалау және ластану деңгейін кеңістіктік тұрғыда анықтау.

Зерттеу міндеттері:

1. Алматы қаласының экологиялық жағдайына талдау жасап, негізгі ластану көздерін анықтау;
2. Атмосфералық ауаның сапасын анықтауға арналған сенсорлық құрылғыларды дрон платформасына интеграциялау әдісін әзірлеу;
3. Өнеркәсіптік кәсіпорындар мен автомобиль магистральдары маңында дрон көмегімен эксперименттік өлшеулер жүргізу;
4. Жиналған деректерді стационарлық станциялар мәліметтерімен салыстыра отырып, ауа сапасының кеңістіктік өзгерістерін талдау;
5. Атмосфералық ауаның экологиялық қауіпсіздігін бағалауға арналған картографиялық және аналитикалық материалдар жасау.

Әдіснамалық негіз және әдістер

Зерттеу жұмысының әдіснамалық негізін экологиялық мониторинг теориясы, урбанистік экология, атмосфералық ауа сапасын бағалау әдістемелері және геоакпараттық жүйелерді (ГАЗ) пайдалану принциптері құрайды. Атмосфералық ауаның сапасын кешенді бағалау Қазақстан Республикасының «Қоршаған ортаны қорғау туралы» заңына, Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының (ДДҰ) ұсыныстарына және ұлттық санитарлық нормалар мен ережелерге сәйкес жүргізілді.

Зерттеу барысында келесі әдістер қолданылды:

1. Аспаптық өлшеу әдісі.

Дронға орнатылған сенсорлық құрылғының көмегімен атмосфералық ауа құрамындағы PM_{2.5}, PM₁₀, CO, NO₂, SO₂ сияқты негізгі ластаушы заттардың концентрациясы өлшенді.

2. Кеңістіктік-уақыттық мониторинг.

Өлшеулер әртүрлі биіктіктерде (10–100 м) және өнеркәсіптік аймақтар мен магистральдар бойында жүргізілді. Бұл тәсіл ластаушы заттардың таралу динамикасын анықтауға мүмкіндік берді.

3. Геоақпараттық талдау.

Жиналған деректер ArcGIS/QGIS бағдарламалық қамтамасыз етуі арқылы өңделіп, ластану деңгейінің карталары жасалды. Бұл әдіс экологиялық қауіпті аймақтарды анықтауда тиімді болды.

4. Салыстырмалы әдіс.

Дрон арқылы алынған мәліметтер Алматы қаласындағы стационарлық мониторинг станцияларының ресми деректерімен салыстырылды.

5. Статистикалық талдау.

Өлшеулердің нәтижелері математикалық өңдеуден өткізіліп, орташа мәндер, стандарттық ауытқулар және ауытқу диапазондары анықталды.

Бұл әдістердің үйлесімі зерттеу нәтижелерінің сенімділігін қамтамасыз етіп, атмосфералық ауаның экологиялық қауіпсіздігін кешенді бағалауға мүмкіндік берді.

Нәтижелер мен талдау

Зерттеу жұмысының негізгі мақсаты – дронға орнатылған сенсорлық құрылғы көмегімен өнеркәсіптік аймақтар мен ірі магистральдар маңындағы атмосфералық ауаның сапасын бақылау. Әзірге эксперименттік өлшеулер жүргізілмегенімен, әдебиеттер мен бұрынғы зерттеулерге сүйене отырып, күтілетін нәтижелерді сипаттауға болады.

Алматы қаласы бойынша жүргізілген ресми мониторинг деректері (Қазгидромет мәліметтері) PM_{2.5} және PM₁₀ концентрацияларының жиі шекті нормадан асып түсетінін көрсетеді. Әсіресе қыс мезгілінде және көлік жүктемесі жоғары аймақтарда (мысалы, Өл-Фараби даңғылы) ластану деңгейі күрт жоғарылайды.

Дрон арқылы өлшеулер жүргізілген жағдайда төмендегідей үрдістер байқалады деп күтіледі:

1. Өнеркәсіптік аймақтарда SO₂ және NO₂ концентрацияларының артуы, себебі негізгі көздер – өндірістік шығарындылар.

2. Ірі магистральдар бойында (Өл-Фараби даңғылы) CO және NO₂ көрсеткіштерінің жоғары болуы, бұл автокөліктердің шығарындыларымен байланысты.

3. Тұрғын аудандарда орташа деңгейдегі ластану, алайда ДДҰ нормаларынан асып түсуі мүмкін.

4. Салыстырмалы таза аймақтарда (Медеу өңірі) ластану деңгейінің төмен болуы.

Үлгілік кесте – Күтілетін нәтижелер (әдебиеттер негізінде)

Өлшеу орны	PM2.5 (күтілетін , мкг/м³)	PM10 (күтілетін , мкг/м³)	CO (күтілетін , мг/м³)	NO ₂ (күтілетін , мг/м³)	Өлшеу орны
Өнеркәсіптік аймақ (Алатау)	80–90	120–140	4.0–4.5	0.14–0.16	Өнеркәсіптік аймақ (Алатау)
Ірі магистраль (Әл-Фараби даңғ.)	85–95	110–130	4.5–5.2	0.16–0.19	Ірі магистраль (Әл-Фараби даңғ.)
Тұрғын аудан (Бостандық ауд.)	55–65	70–85	2.5–3.0	0.09–0.11	Тұрғын аудан (Бостандық ауд.)
Салыстырмалы таза аймақ (Медеу)	30–40	45–55	1.3–1.6	0.05–0.07	Салыстырмалы таза аймақ (Медеу)

Бұл кесте нақты өлшем емес, күтілетін мәндерді көрсетеді.

Талдау

- Дрон көмегімен алынатын деректер стационарлық станциялардан гөрі кеңістіктік тұрғыдан толық және нақты болады деп күтіледі.
- Ластану деңгейінің биіктік бойынша өзгерісін анықтау мүмкіндігі артады.
- Нәтижелер негізінде экологиялық қауіпті аймақтарды картаға түсіру жоспарлануда.

Қорытынды

Зерттеу жұмысының нәтижесінде дронға орнатылған ауа сапасын өлшейтін құрылғыларды пайдалану Алматы қаласының өнеркәсіптік аймақтары мен ірі магистральдары маңындағы атмосфералық ауаның ластану деңгейін бағалаудың тиімді әдісі бола алады деген қорытындыға келдік. Бұл тәсіл ластану көздерін нақты анықтап, экологиялық қауіпсіздікті кешенді бағалауға мүмкіндік береді.

Ұсыныстар:

1. Алматы қаласының экологиялық мониторинг жүйесіне дрон технологиясын енгізу;
2. Өнеркәсіптік аймақтар мен Әл-Фараби даңғылы бойында тұрақты бақылау жүргізу;
3. Жиналған деректерді GIS негізінде картаға түсіріп, қауіпті аймақтарды анықтау;
4. Қала тұрғындарының денсаулығын қорғау үшін атмосфералық ауа сапасына қатысты нормативтік талаптарды қатаңдату.

Әдебиеттер тізімі

1. Қазақстан Республикасының «Қоршаған ортаны қорғау туралы» Заңы. – Астана, 2007.
2. Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымы (ДДҰ). Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. – WHO, 2021.
3. «Қазгидромет» РМК. Алматы қаласының атмосфералық ауасының сапасы бойынша жылдық есеп. – Алматы, 2023.
4. Nazarbekov A., Alimova G. Air pollution and public health in Almaty: challenges and solutions // Environmental Research Journal. – 2022. – №15. – Б. 45–52.

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗАХ (Россия, г. Москва)

Овчинникова Татьяна Игоревна

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
(Университет науки и технологий МИСИС)

Аннотация. Статья посвящена вопросам повышения качества подготовки специалистов в области техносферной безопасности в технических вузах. Рассматриваются современные тенденции и проблемы, возникающие в процессе обучения студентов данному направлению. Техносферная безопасность является одним из важнейших направлений профессиональной подготовки, поскольку оно связано с обеспечением защиты населения и окружающей среды от негативных воздействий техногенных факторов в различных отраслях промышленности, особенно на энергетических объектах.

Подготовка высококвалифицированных профессиональных специалистов в области обеспечения безопасности труда и здоровья, промышленной и экологической безопасности позволяет эффективно решать задачи на объектах промышленности в рамках национальной стратегии России.

Ключевые слова: техносферная безопасность, безопасность труда, промышленная и экологическая безопасность, образовательная модель, обучение, модульные технологии, электронное обучение, онлайн обучение, непрерывный образовательный процесс.

12 мая 2023 года Президент Российской Федерации подписал важный документ — **Указ № 343 «О некоторых вопросах совершенствования системы высшего образования»** [1]. Этот нормативно-правовой акт стал предметом широкого обсуждения в российском образовательном сообществе

благодаря своей новаторской инициативе, направленного на преобразование структуры уровней высшего профессионального образования.

Согласно этому документу, были определены шесть высших учебных заведений, которым поручено активное участие в разработке и апробации изменений в структуре образовательной системы. Эти учреждения представляют собой ключевые площадки, где реализовываются первые шаги реформы высшего образования, закладывая основу для дальнейших масштабных преобразований. Таким образом, указанный Указ играет ключевую роль в переосмыслении традиционной модели российского высшего образования, открывая перспективы для качественного улучшения подготовки специалистов и гармонизации отечественной образовательной системы с международными стандартами [2].

Ключевые изменения в образовательной модели:

- Усиление **роли работодателей** в разработке и реализации образовательных программ. **Стажировки преподавателей.**

- Обеспечение необходимого уровня **фундаментальной подготовки** и практических навыков студентов в рамках единого образовательного пространства.

- Увеличение объема **практической подготовки** в каждой образовательной программе.

- Внедрение **персонифицированного подхода**, обеспечивающего постоянный рост мотивации студентов к обучению.

- Подготовка конкурентоспособного специалиста за счет **интеграции образовательной, научной, инновационной и внеучебной деятельности** [3].

В соответствии с Указом, в течение 3-х лет, начиная с 2023/24 учебного года, выбранные высшие учебные заведения приступили к осуществлению приема студентов по новым ступеням высшего образования. Реформа предусматривает следующую структуру образовательных программ:

- Первый уровень — базовая ступень высшего образования продолжительностью от четырех до шести лет.

- Второй уровень — специализированные программы высшего образования, реализуемые в рамках магистратуры (продолжительность от одного до трех лет), а также ординатуры и ассистентуры-стажировки.

Отдельным уровнем выступает программа аспирантуры, предназначенная для углубленной подготовки научных кадров.

Подготовка квалифицированных специалистов в области техносферной безопасности является одной из приоритетных задач технического высшего образования. Техносферная безопасность включает комплекс мероприятий, направленных на обеспечение безопасной жизнедеятельности населения и защиту окружающей среды от вредных воздействий промышленной деятельности, природных и антропогенных факторов риска. Для успешного выполнения этих функций специалисты должны обладать глубокими знаниями и навыками в области инженерии, экологии, экономики и права [4].

В Университете науки и технологий МИСИС (НИТУ МИСИС) обучение по направлению «**Техносферная безопасность**» осуществляется по следующим образовательным программам:

- **Базовое высшее образование (БВО)** - 22.03.02 Metallurgy

Образовательный трек - Управление системами безопасности и рисками в металлургии

- Магистратура - 20.04.01 Техносферная безопасность

профиль «Управление безопасностью технологических процессов и производств»

- Обучение в аспирантуре по группе научной специальности 2.10 Техносферная безопасность: 2.10.1 Пожарная безопасность; 2.10.2 Экологическая безопасность; 2.10.3 Безопасность труда.

Однако существующая система подготовки специалистов сталкивается с рядом проблем, решение которых возможно лишь при условии целенаправленного реформирования всей системы подготовки специалистов по техносферной безопасности.

Основные проблемы охраны труда на промышленных предприятиях включают:

- ✓ Высокий риск аварий, травм и профессиональных заболеваний.
- ✓ Недостаток квалифицированных кадров: либо есть опыт, но нет образования, либо есть образование, но нет опыта.
- ✓ Формальный подход к системе управления охраной труда, включая оценку рисков и планирование мероприятий.
- ✓ Недостаточная мотивация сотрудников.

Проблемы с трудовой адаптацией и инструктажем.

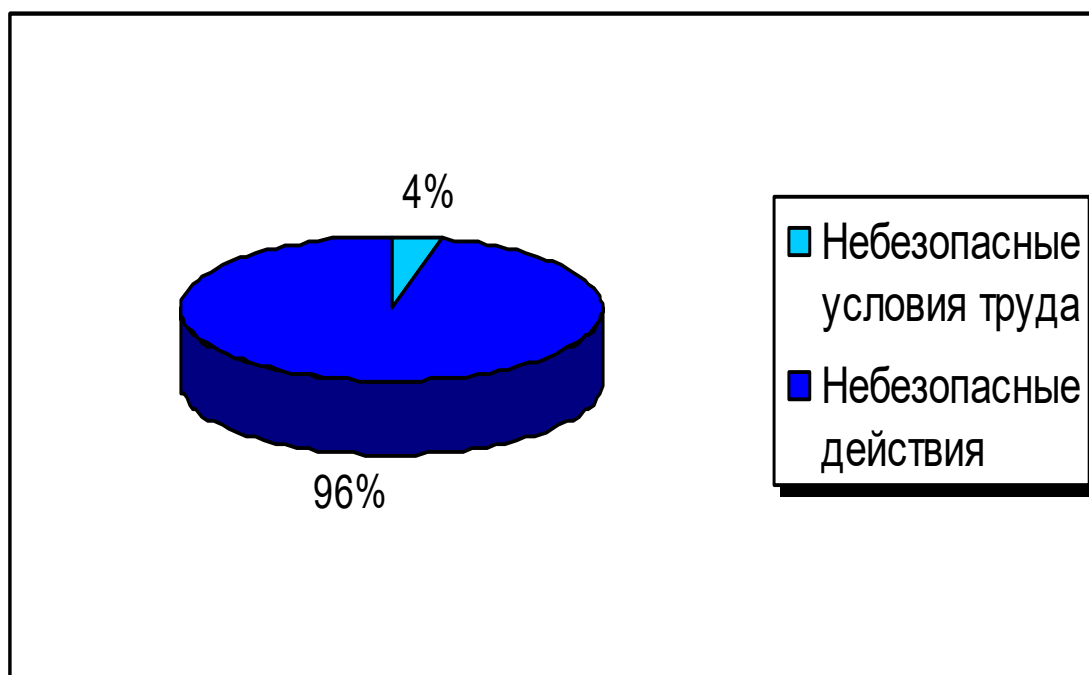


Рис.1. Распределение факторов риска в сфере охраны труда

Основная мысль, которую демонстрирует круговая диаграмма на рисунке 1, показывает, что подавляющее большинство проблем связано с небезопасными действиями (96%), а не с небезопасными условиями труда, которые составляет лишь 4%.

Таким образом, нужна подготовка специалистов нового уровня, которые понимают технологические процессы и умеют использовать современные инструменты для управления производственными, экологическими и профессиональными рисками, которые разрабатывают и внедряют цифровые решения для повышения безопасности и конкурентоспособности производства, а главное смогу обеспечить безопасные действия персонала на предприятиях. Ключевые элементы подготовки таких специалистов в рамках новой образовательной модели представлены на рисунке 2.



9

Рис. 2 Пути развития образования в области безопасности труда

Получение первичных профессиональных навыков является началом освоения профессии.

Эти навыки, на основе полученных теоретических знаний, обучающиеся получают и закрепляют во время прохождения учебных и производственных практик, предусмотренных основными профессиональными образовательными программами, а также стажировок. Актуальность тем научно-исследовательских работ однозначно должна соответствовать актуальным существующим проблемам на промышленных объектах, что дает возможность обучающимся отвечать запросам работодателя и уже на стадии обучения работать на исследуемом предприятии.

Следует отметить, что цифровые технологии существенно повлияли и на сферу высшего образования, открыв перспективы активного участия

работодателей в образовательном процессе, минимально отвлекаясь от основной производственной деятельности.

В настоящее время электронные технологии активно применяют в образовательном процессе высших учебных заведений при проведении различных видов занятий (учебных, лабораторных и практических занятий, практик, текущего контроля, промежуточной аттестации обучающихся и т.д.) [5].

Применение в учебном процессе МООС (МООС – «Massive open online courses») становится популярным. Порталы зарубежных онлайн курсов исчисляются сотнями ресурсов, из которых наибольшую популярность завоевали EdX, Coursera, Academic Earth, Udacity, Khan Academy т.д., среди русскоязычной аудитории известны и широко применяются порталы «Универсариум», «Лекториум», «Интуит», а также «Открытое образование» [6].

Идея применения онлайн курсов не заключается в замене традиционного образования, а направлена на совершенствование педагогических технологий, оптимизацию учебного процесса, создание дополнительной информационной среды, расширение пространственных и временных рамок процесса обучения, повышение эффективности обучения [5,6].

НИТУ МИСИС реализует электронное обучение, используя платформы «Открытое образование», LMS Moodle (LMS – Learning management system) и MS Teams. Первая система – открытые онлайн курсы, разработанные преподавателями НИТУ МИСИС (массовые курсы) доступные всем, вторая – закрытая система, используемая для специальных дисциплин, третья – пространство для группового общения, позволяющее осуществлять синхронное взаимодействие преподавателя и обучающихся.

Одной из первых дисциплин, реализованных преподавателями НИТУ МИСИС на платформе «Открытое образование» [7] в качестве онлайн курсов в 2016 году, была «Безопасность жизнедеятельности» – обязательная дисциплина федеральных государственных образовательных стандартов всех направлений бакалавриата и специалитета. Интеграция онлайн курсов в традиционное классическое обучение предполагает собой смешенное обучение, то есть онлайн и офлайн формат [6].

В условиях интеграции в образовательный процесс онлайн курсов в рамках реализации образовательных программ высшего образования и дополнительного профессионального образования очные лекционные занятия проводятся в привычном режиме дополняя лекции обсуждением вопросов и сложностей заблаговременно просмотренной обучающимися на портале видео лекции. В зависимости от направления подготовки студентов преподаватель дополняет лекционный материал профессиональной спецификой. На практических занятиях разбираются наиболее сложные аспекты решения задач, представленных на платформе. Лабораторные работы проводятся в классическом очном режиме по расписанию занятий в специализированных лабораториях [5].

Интеграция цифровых технологий обеспечивает эффективное взаимодействие обучающихся с представителями работодателя посредством

дистанционного подключения профильных специалистов в области охраны труда, промышленной и экологической безопасности, выступающих в роли лекторов в рамках специализированных учебных курсов, что способствует непрерывному совершенствованию образовательной системы.

Заключение

Проведенный анализ показал, что современная ситуация требует качественно нового подхода к подготовке специалистов в области техносферной безопасности. Указ Президента Российской Федерации № 343 от 12 мая 2023 года внес существенные изменения в структуру высшего образования, направленные на усиление роли работодателей в создании образовательных программ, увеличение объемов практической подготовки и реализацию персонифицированного подхода к обучению. Эти меры призваны сформировать конкурентоспособных специалистов, соответствующих требованиям современного промышленного комплекса.

Одним из ключевых аспектов преобразования системы подготовки специалистов является широкое использование электронных и дистанционных технологий обучения, что предоставляет возможность дополнять онлайн-материал специализированными модулями и проводить интерактивные сессии с участием опытных отраслевых специалистов и в том числе улучшает сотрудничество университетов с предприятиями реального сектора экономики.

В целом, предложенные подходы к модернизации системы подготовки специалистов в области техносферной безопасности создают базу для формирования высококвалифицированных инженеров и управленцев, способных эффективно обеспечивать безопасность и устойчивость промышленных объектов.

Список литературы

1. Указ Президента РФ от 12.05.2023 N 343 "О некоторых вопросах совершенствования системы высшего образования".
2. Кузнецов Д.С., Меркулова А.М., Ришко Ю.И., Травянов А.Я. Совершенствование высшего металлургического образования. Опыт университета МИСИС // Черные металлы. -2025.- №9. - С. DOI 10.17580/chm.2025.09.09
3. Ришко Ю.И., Волков А.А., Фильченкова И.Ф. Моделирование инженерного образования в Университете МИСИС в рамках пилотного проекта. Проблемы современного педагогического образования. – 2025. – № 86-3. – С. 248-251.
4. Овчинникова Т. И., Меркулова А. М. О кафедре техносферной безопасности Университета науки и технологий МИСИС / // Черные металлы. – 2024. – № 8. – С. 56-57.
5. Баловцев С. В., Меркулова А. М., Овчинникова Т. И. Онлайн-курсы в обеспечении образовательного процесса в условиях режима повышенной

готовности / // Высшее образование сегодня. – 2020. – № 8. – С. 8-11. – DOI 10.25586/RNU.HET.20.08.P.08.

6. Баловцев С.В. Инновационные технологии подготовки кадров в сфере управления промышленной безопасностью // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № S4. – С. 3-10.

Курс «Безопасность жизнедеятельности» [Электронный ресурс] // URL: <https://openedu.ru/course/misis/SAFETY/> (Дата обращения: 11.11.2025).

СОДЕРЖАНИЕ

НАПРАВЛЕНИЕ «ЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА».....	5
ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: ЛЮДИ, ТЕХНОЛОГИИ, ОТВЕТСТВЕННОСТЬ Хайрушев Жакып Галиевич.....	5
СЕКЦИЯ 1 «ЦИФРОВАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: SMART GRID ТЕХНОЛОГИИ».....	11
REMOTE MONITORING SYSTEM FOR REACTIVE POWER COMPENSATION USING IOT TECHNOLOGIES Rakhmonov I., Atajiyev Sh.	11
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКОВОГО РЕЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО СТЕНДА В СРЕДЕ ВИЗУАЛЬНОГО ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ FLPROG Давранов А. И., Зенченко А. Ю., Нигматуллин Р. М., Агимов Т.Н.	15
АСИНХРОНДЫ МАШИНАДАҒЫ ӨТПЕЛІ ҮРДІСТЕРДІ ЗЕРТТЕУ Ғали А.К., Алмуратова Н.К.	20
ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЛОКЧЕЙН- ТЕХНОЛОГИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ КАЗАХСТАНА Кабденов М.М., Нигматуллин Р. М., Агимов Т.Н.	24
ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ В СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ Комекбай Д.Н., Зенченко А.Ю., Нигматуллин Р.М., Агимов Т.Н.	36
DEVELOPMENT OF THE OPERATING ALGORITHM FOR AN AUTOMATIC CONTACTLESS VOLTAGE SAG REGULATION CIRCUIT Korjobova M.F., Jalilova D.A., Rafikova G.R.	42
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ НА РАБОТУ ЦИФРОВЫХ РЕЛЕЙНЫХ ЗАЩИТ Косы Н.А.	47
SHORT-TERM OPERATIONAL PLANNING OF DISTRIBUTION NETWORKS WITH ACTIVE POWER LOSS CONSIDERATION Makhmudov T.F.	54

МУНАЙ ҚҰБЫРЫ СОРҒЫЛАРЫНЫҢ ЭЛЕКТР ЖЕТЕГІНДЕ ҚОЛДАНЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯ ҮНЕМДЕЙТІН АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫ ЖОБАЛАУ	
Нурмадиева Э.А., Ғали К.О.	59
ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ	
Таштенов А.Н, Ауталипов Д.Н.	64
THERMAL MANAGEMENT OF LIGHTING DEVICES AND ITS TYPES	
Rakhmonov I.U., Toirov M.T.	71
МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ РОСТА ДОЛИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ	
Тоиров М.Т., Ниёзов Н.Н.	75
ПРИМЕНЕНИЕ ЭВРИСТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ PSS ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ЗАПАДНОЙ ЗОНЫ КАЗАХСТАНА	
Васильев Д.С., Серік С.А.*, Кенесов Е.К., Бектимиров А.Т., Карибаев Т.Д.	82
ЭЛЕКТР БЕРІЛІС ЖЕЛІЛЕРІНІҢ АҒЫМДАҒЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ РЕЖИМІН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ АҒЫННЫҢ ТАРАЛУЫН ЕСЕПТЕУДІ ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ТАЛДАУ	
Ыбырайхан К.А.	93
ТЕОРИЯ ГРАФОВ И ОПЕРАТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ	
Ахметбаев Д.С., Ахметбаев А.Д., Керимбеков К.Р., Кошмаганбетова А.А.	97
РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ	
Баймаганов А.С., Креслина С.Ю., Болдырева Л.П., Ергалиева Г.	102
ОСОБЕННОСТИ ПУСКО-ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМОВ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ	
Тергемес Қ.Т., Алдибеков И.Т., Бестерекова А.Н., Даркенбаева Э.Б., Мұсахан Д.Ә.	107

ТӨМЕН КЕРНЕУЛІ АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРДЫҢ ОРЫНБАСУ СХЕМАСЫ ПАРАМЕТРЛЕРІ МЕН ІСКЕ ҚОСУ СИПАТТАМАЛАРЫН ЕСЕПТЕУДІҢ ЖАҢА ӘДІСТЕМЕСІ Заур А.Т., Шыныбай Ж.С.	113
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ 6-35 КВ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ Кузнецов В.А., Дмитриченко В.И., Башкиров М.В., Жагыпаров Е.Н., Жагыпарова М.Х.	117
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБЪЕДИНЕНИЯ ЗАПАДНОЙ ЭНЕРГОЗОНЫ С ЕЭС РК Саурамбаев А., Михалкова Е.Г.	122
ТАСПАЛЫ КОНВЕЙЕРДІҢ АЙНЫМАЛЫ ТОКТЫ ЖИІЛІГІНІҢ РЕТТЕЛЕТІН ЭЛЕКТР ЖЕТЕГІНІҢ АВТОМАТТЫ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНІҢ ПАРАМЕТРЛІК СИНТЕЗІ Тойгожинова Ж.Ж., Чныбаева Д.М.	127
ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ Абылгазин Э.Е.	133
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ И КОНФИГУРАЦИИ SVC В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА РОЯ ЧАСТИЦ Абылкаиров Т.М., Орлеанский С.А., Бектимиров А.Т.	138
АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЗАПАСОВ УСТОЙЧИВОСТИ Айсаев Е.С., Тергемес К.Т., Шерьязов С.К., Диярова Л.Д.	145
РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ПАУ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ИНТЕГРАЦИИ ВИЭ В ЮЖНОЙ ЗОНЕ ЕЭС РК Ахмедов Д.Е., Бектимиров А.Т., Збырня Д.А.	156
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ СОЛНЕЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ СЭС В ЮКО Апостол С.Ф., Михалкова Е.Г.	163
ШУНТТЫҚ РЕАКТОРЛАРДЫҢ ШУ МЕН ДІРІЛДІ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЖЕТІЛДІРУ АРҚЫЛЫ АЗАЙТУ ТӘСІЛДЕРІ Қойлыбаев М.Ж., Әмитов Е.Т.	170

СЕКЦИЯ 2 «ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ (ВИЭ)»	187
EFFECT OF TEMPERATURE ON PHOTOVOLTAIC CHARACTERISTICS OF PV MODULES BASED ON CIGS SOLAR CELLS	
Akbarov F.A., Kabulov R.R., Alimov A.A., Muminov Kh.A.	187
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ НАНОКОМПОЗИТНЫЕ АБСОРБЕРЫ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ И ОПРЕСНЕНИЯ ВОДЫ В УСЛОВИЯХ КАЗАХСТАНА	
Аманбаев А., Онгар Б.	192
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНО ОСЕВОГО ВЕТРОДВИГАТЕЛЯ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НА ФИЗИЧЕСКОМ СТЕНДЕ	
Агимов Т.Н.	208
ТОМЕН ЖЕЛДІ АЙМАҚТАР ҮШІН МОДУЛЬДІ КҮН–ЖЕЛ ГИБРИДТІ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ІСКЕ АСЫРЫЛУЫН ЗЕРТТЕУ	
Алдиарбек Н.Е., Онгар Б., Нигматуллин Р.М., Сарсенбаев Е.А.	220
ЕКІӨЛШЕМДІ МАТЕРИАЛДАРДЫ МОДЕЛДЕУДІҢ НЕГІЗДЕРІ:ТЕОРИЯДАН ПРАКТИКАҒА	
Байкадамова Л.С., Қаптағай Г.Ә., Қойлық Н.О.	224
MODELING AND RESEARCH OF INVERTER FOR SOLAR POWER PLANT	
Sagyndikova A.Z., Bolatuly R.	230
ЖЭС-ТІҢ ОҢТАЙЛЫ ОРНАТЫЛҒАН ҚУАТЫН АНЫҚТАУ БАРЫСЫН ТАЛДАУ	
Кенжебаев Ә.Ә., Сагындикова А.Ж.	236
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ДЕРЕВА «ПАВЛОВНИЯ» ДЛЯ ПИРОЛИЗНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В КАЗАХСТАНЕ	
Хамит И., Нигматуллин Р. М., Казанина И.В.	247
ЖЫЛУ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРЫ ЖАБДЫҚТАРЫНЫҢ СЕНІМДІЛІГІ МЕН ПАЙДАЛАНУ ДАЙЫНДЫҒЫН БАҒАЛАУДЫҢ ЖАҢА САЛЫСТЫРМАЛЫ ЖҮЙЕСІ: АҚАУЛАР КЕСТЕСІН ТАЛДАУ	
Ныгыманова А.С., Онгар Б., Сарсенбаев Е.А.	254
ҚАЗБА ОТЫННЫҢ ҚОЛЖЕТІМДІ ЖАҒДАЙЫНДА ҚАЗАҚСТАНДА ЖАҢАРТЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯ КӨЗДЕРІН ИНТЕГРАЦИЯЛАУДАҒЫ ҚИЫНДЫҚТАР	
Қанатбаева Г.Ж., Расмухаметова А.С.	265

АВТОНОМДЫ ЭЛЕКТРМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ КОНДЕНСАТОРЛАРДЫ ПАЙДАЛАНЫП ЭЛЕКТР ҚОЗҒАЛТҚЫШЫН ІСКЕ ҚОСУДЫ МОДЕЛЬДЕУ	
Рашидов Ш.У., Умбеткулов Е.К.	271
КОМПЛЕКСНЫЕ МЕТОДЫ МОЛНИЕЗАЩИТЫ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГРОЗОВЫХ РИСКОВ В ВЕТРОЭНЕРГЕТИКЕ	
Курбонов Н.Н., Рашидов Н.Х.	275
ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕГИРУЮЩЕГО СЛОЯ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННОГО ФОСФОРСОДЕРЖАЩЕГО РАСТВОРА В УСЛОВИЯХ БЫСТРОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА	
Сулейменова А., Кусайнова А., Нусупов К., Султанов А., Бейсенханов Н.	282
ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКА ЖҮЙЕСІНДЕ ТҮТІК ТӘРІЗДІ КҮН КОЛЛЕКТОРЛАРЫНЫҢ ИНТЕГРАЦИЯСЫ: ТЕХНИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ЭКОНОМИКАЛЫҚ ТИІМДІЛІКТІ БАҒАЛАУ	
Токпеисова Г.Ш., Онгар Б., Дүйсенбек Ж.С.	287
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ДИАГНОСТИКИ ИНВЕРТОРОВ В КРУПНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ	
Узоков Н.Ч., Рахмонов И.У.	297
INTERMETALLIC COMPOUNDS FOR HYDROGEN STORAGE: A REVIEW OF STRUCTURAL, KINETIC, AND CATALYTIC ASPECTS WITH A FOCUS ON PD–TI–MG SYSTEMS	
Kurbanbekov Sh.R., Skakov M.K., Zhakiyeva A.Ye., Tshe V.K., Kaldar B.S., Amangeldieva Y.O.	302
ФОТОВОЛЬТАИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІҢ ЖҰМЫСЫН БҰЛТТЫ АУА РАЙЫНДА БАҒАЛАУ: ЭКСПЕРИМЕНТТІК ӨЛШЕУЛЕР МЕН ЦИФРЛЫҚ МОНИТОРИНГ НӘТИЖЕЛЕРІ	
Жақсылық Н.Н., Скаков М., Генч Н., Чорух А., Раманкулов Ш.Ж.	309
ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ «АРКАЛЫК» 50 МВт	
Жұбанов А.М., Нигматуллин.Р.М.	317

ҚАЗАҚСТАННЫҢ СУ ҚОЙМАЛАРЫ МЕН КҮН РЕСУРСТАРЫН
ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП ГИБРИДТІ КҮН-ЖЕЛ-ГИДРО ЖҮЙЕСІН
ЖОБАЛАУ: ТЕХНИКАЛЫҚ – ЭКОНОМИКАЛЫҚ ТАЛДАУ

**Жанпейісова А.О., Сарсенбаев Е.А., Орынбаев С.А.,
Абдлахатова Н.Ш.⁴..... 323**

ОБОСНОВАНИЕ МЕСТА СТРОИТЕЛЬСТВА СЭС В АЛМАТИНСКОЙ
ОБЛАСТИ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
МОЩНОСТЕЙ "ЛУКОЙЛ КАЗАХСТАН»

Кусаинов А., Калиева К..... 332

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ КАЗАХСТАНА

Омаров Р.А., Омар Д.Р., Асан Р.О., Демесова С.Т., Турымбетова Г.Д... 336

ЖЕЛ ТУРБИНАЛАРЫН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, ЕКІ АЙМАҚТЫҚ
ЖЕЛІДЕГІ ЖИЛІКТІ РЕТТЕУДІ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Темірханұлы Ж., Наурыз Б.К..... 343

СЕКЦИЯ 3 «СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ВОПРОСЫ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ТЕПЛОВОЙ И АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ»..... 351

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
МАЛОМОЩНЫХ КОТЛОВ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ
ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА

**Амренова А.Ж., Достияров А.М., Яманбекова А.К., Умышев Д.Р.,
Дүйсенбек Ж.С. 351**

СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИСТИКА УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ
ПРИМЕНЕНИЯ В НИЗКОУГЛЕРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

**Скаков М.К., Миниязов А.Ж., Градобоев А.В., Агатапова А.А.,
Туленберген Т.Р. 355**

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ И
КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ
12X18H10T И AISI 316 ТРУБОПРОВОДОВ АЭС

Ақболатов Е.Ж., Скаков М.К..... 359

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДЫ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ТВЭЛОВ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ	
Анохин Е.М.	365
СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН ТЭС И АЭС	
Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю., Хисмет Е.	368
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ УГЛЯ В НЕВЕНТИЛИРУЕМОЙ ШАРОВОЙ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЕ	
Каримолданова М.А., Әкімбек Г.Ә., Алияров Б.К.	377
ДЕРБЕС ЖЫЛУМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ ЕКІ ТІЗБЕКТІ ГАЗ ҚАЗАНДАРЫН ҚОЛДАНУ ТИІМДІЛІГІ	
Кемпірбеков Е.Н., Абильдинова С.К.	383
CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ТВЭЛОВ РЕАКТОРА ИВГ.1М	
Мартыненко Е.А., Скаков М.К., Бекмулдин М.К.	392
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ КАК НОВЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ	
Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю., Мугалбек Е.	398
PHASE COMPOSITION OF HYDROGEN STORAGE MATERIALS BASED ON COBALT-MODIFIED LaNi_5	
Skakov M.K., Mukhamedova N.M., Miniyazov A.Zh., Oken O., Nassyrova A.K.	408
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОРОШКОВ ИЗ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ	
Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю., Сабитов А.	413
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССОВОЙ ДОЛИ ВЛАГИ В СОЕВОЙ ОКАРЕ	
Садықова А.Қ., Ниязбаев А.К.	424
АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА КАК ФАКТОР ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ НЕЗАВИСИМОСТИ КАЗАХСТАНА	
Закен М.Г., Мясоедова Е.Н.	430
ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫН ӨНДІРУ ҮДЕРІСТЕРІНІҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ТАЛДАУЫ: ЖЭС ҮШІН КЕШЕНДІ ТӘСІЛ	
Асқарұлы М., Онгар Б., Дүйсенбек Ж.С.	437

ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ ВИХРЕВЫХ ТРУБОК	
Касымов Р.Р., Муханов Б.К.	445
АТОМДЫҚ ФИЗИКА МЕН АТОМ ЭНЕРГЕТИКАСЫНЫҢ ЗАМАНАУИ ДАМУЫ: ӘДІСТЕМЕЛІК ЖӘНЕ ҒЫЛЫМИ ТАЛДАУ	
Уәлихан А.Ш., Скаков М.К., Канлы У., Раманкулов Ш.Ж.	452
HYDROGEN AS THE KEY TO GREEN ENERGY: OPPORTUNITIES, CHALLENGES AND TECHNOLOGICAL BARRIERS	
Malgorzata Rutkowska-Gorczyca	458
 СЕКЦИЯ 4 «ПРОМЫШЛЕННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»	 464
УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ СКЛАДСКИХ ПОМЕЩЕНИЙ С УЧЕТОМ УЛУЧШЕНИЙ УСЛОВИЙ ТРУДА	
Абикенова А.А., Амирканова Г.Е.	464
МҰНАЙ ӨНДЕУ ЗАУЫТТАРЫНДАҒЫ ТЕХНОГЕНДІК ҚАУІПТІЛІКТЕРДІ БАСҚАРУДАҒЫ ЗАМАНАУИ ТӘСІЛДЕР	
Исатаева А.К., Қалманбай Н.Қ., Абдибаттаева М.М.	469
ӨНДІРІСТІК ОБЪЕКТІЛЕРДІ ЕҢБЕК ЖАҒДАЙЛАРЫ БОЙЫНША АТТЕСТАТТАУДАН КӘСІПТІК ТӘУЕКЕЛДЕРДІ БАСҚАРУҒА ДЕЙІНГІ ТЕТІКТЕРДІ ЖАҢҒЫРТУ – ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ЕҢБЕКТІ ҚОРҒАУДЫҢ ТӘУЕКЕЛГЕ НЕГІЗДЕЛГЕН МОДЕЛІНЕ КӨШУДІҢ НЕГІЗІ	
Қалманбай Н.Қ., Исатаева А.К.	472
ЖЕР СІЛКІНІСІ ТУРАЛЫ ЕРТЕ ЕСКЕРТУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕГІ АҚПАРАТТЫҚ-КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР: ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ТӘЖІРИБЕ ЖӘНЕ ҚАЗАҚСТАН ҮШІН ПЕРСПЕКТИВАЛАР	
Маратова К.А., Бегимбетова А.С.	479
ГЛОБАЛЬНАЯ КЛИМАТИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА И КАЗАХСТАН	
Есекина Б.К., Кокорин А.О., Нурушев Д.А.	483
СИНТЕЗ ГРАФЕНА НА ПОВЕРХНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТОКОСЪЕМНИКОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ	
Приходько Н.Г., Абжал Д.К.	490

ЕҢБЕК ҚОРҒАУ БОЙЫНША ОҚЫТУ ЖҮЙЕЛЕРІНЕ МИКРОЛЕРНИНГ ӘДІСІН ЕНГІЗУ	
Танабаева З.Р.	495
ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДАҒЫ ЖОБАЛАРДЫ БАСҚАРУ СТАНДАРТТАРЫ: ЖАЙ-КҮЙІ ЖӘНЕ ДАМУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ	
Габелашвили К.Р., Тулегенова С.К., Нурмуратова Л.С.	499
ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДАҒЫ МҰНАЙ ӨНДІРУ КӘСІПОРЫНДАРЫНЫҢ АҒЫНДЫ СУЛАРЫН ТАЗАРТУ МӘСЕЛЕЛЕРІНІҢ ТАЛДАУЫ	
Алибек Ш.Б., Жандаулетова Ф.Р.	507
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЭЦ С ЦЕЛЮ МИНИМИЗАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ	
Мусаева Ж.К., Амренова А.Ж.*, Бегимбетова А.С., Сагытаева К.А., Жойқынбекова Ә.Т.	510
ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ СУ РЕСУРСТАРЫНЫҢ ЖАҒДАЙЫНА ӘСЕР ЕТЕТІН АНТРОПОГЕНДІК ЖӘНЕ ТАБИҒИ ФАКТОРЛАРДЫ ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ БАҒАЛАУ	
Баедилов Қ.Е., Санатова Т.С., Айтбаева Ж.М.	516
УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ НА ГЭС С ЦЕЛЮ СНИЖЕНИЯ АВАРИЙ	
Демеуов Б.М., Жандаулетова Ф.Р.	523
ENVIRONMENTAL ASPECTS OF WATER RESOURCES MANAGEMENT IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN	
Zhandauletova F.R., Abikenova A.A. *, Beysekova T.I., Bekmuratova N.S.	532
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСАЖДЕНИЕ ПЫЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ЗАРЯЖЕННЫМИ КАПЛЯМИ ВОДЫ	
Аршидинов М.М., Креслина С.Ю., Болдырева Л. П.	536
ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ӨНДІРІСТІК ЖАРАҚАТТАРДЫҢ АЛДЫН АЛУ ЖӘНЕ ЕҢБЕКТІ ҚОРҒАУДА ТӘУЕКЕЛДЕРДІ БАҒАЛАУ ЖӘНЕ ЕСЕПТЕУ ӘДІСТЕРІ	
Құлжанова Д.Б.	543

ИНЖЕНЕР АДАМИ КАПИТАЛ ИЕСІ РЕТІНДЕ ПОСТИНДУСТРИАЛДЫ ҚОГАМНЫҢ ӨНДІРГІШ КҮШІ ЖӘНЕ ОНЫ ҚАРЖЫЛАНДЫРУ МЕХАНИЗМДЕРІ	
Нұрпейіс Е.М.	548
ТАБИҒИ СУЛАРДЫ ТАЗАРТУ ӘДІСТЕРІ	
Сұлтанбек А.С.	553
ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЭЦ-3 НА ПРИРОДНУЮ ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ	
Турумбетова Е.Б., Абикенова А.А.	556
ФОСФОР ӨНЕРКӘСІБІНІҢ ҚОРШАҒАН ОРТАҒА ӘСЕРІ	
Бейсекова Т.И., Балабас Л.Х., Шанбаев М.Ж.	561
ЖЭО-1 ШЫҒАРЫНДЫЛАРЫНЫҢ АЛМАТЫ ҚАЛАСЫНЫҢ АУА САПАСЫНА ӘСЕРІ ЖӘНЕ ОНЫ ТӨМЕНДЕТУ ШАРАЛАРЫ	
Шәріпзада А.А., Бегимбетова А.С.	569
ӨНЕРКӘСІПТІК КӘСІПОРЫНДАР МЕН АВТОМОБИЛЬ ЖОЛДАРЫНЫҢ ӘСЕР ЕТУ АЙМАҒЫНДАҒЫ АУА ОРТАСЫНЫҢ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ҚАУІПСІЗДІГІН БАҒАЛАУ	
Шыңғыс А.Ә.	573
ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗАХ (Россия, г. Москва)	
Овчинникова Татьяна Игоревна	577

**«ЭНЕРГЕТИКА, ИНФОКОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ЖӘНЕ
ЖОҒАРЫ БІЛІМ»**

XIII Халықаралық ғылыми-техникалық конференция материалдары

Шартты баспа табағы – 37
Әріп түрі TimesNewRoman
АУЭС, 2025

