

ЭНЕРГЕТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ: ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ

**МАТЕРИАЛЫ
V Всероссийской научно-практической
конференции обучающихся
и преподавателей**



**Санкт-Петербург
2026**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики

МАТЕРИАЛЫ

V Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей

«ЭНЕРГЕТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ: ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ»

16 декабря 2025 г.

Научное издание

*Под общей редакцией
директора Института энергетики и автоматизации,
кандидата технических наук, доцента Т. Ю. Коротковой*

Санкт-Петербург
2026

УДК 620.9
ББК 31
Э 651

Редакционная коллегия:

кандидат технических наук, доцент, директор Института энергетики и автоматизации
Т. Ю. Короткова (Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики);

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплосиловых установок
и тепловых двигателей

В. В. Барановский (Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики);

доктор технических наук, профессор, директор Мегафакультета биотехнологий
и низкотемпературных систем

И. В. Баранов (Национальный исследовательский университет ИТМО)

Э 651 Материалы V Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей «Энергетика, управление и автоматизация: инновационные решения проблем» / Минобрнауки РФ; ФГБОУ ВО «Санкт-Петерб. гос. ун-т промышленных технологий и дизайна»; отв. ред. и сост. М. С. Липатов; под общ. ред. Т. Ю. Коротковой. — СПб: ВШТЭ СПбГУПТД, 2026. — 297 с.

ISBN 978-5-91646-467-2

В настоящем сборнике представлены материалы V Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей «Энергетика, управление и автоматизация: инновационные решения проблем», состоявшейся 16 декабря 2025 года в Санкт-Петербурге.

Сборник предназначен для широкого круга читателей, интересующихся научными исследованиями и разработками преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов учебных заведений, а также всех, проявляющих интерес к рассматриваемой проблематике, с целью использования в научной работе и учебной деятельности.

Материалы представлены в авторской редакции. Ответственность за аутентичность и точность цитат, имен, названий и иных сведений, а также за соблюдение законов об интеллектуальной собственности несут авторы публикуемых материалов. Организаторы конференции не несут ответственность перед авторами и/или третьими лицами за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи.

Материалы конференции размещены в научной электронной библиотеке elibrary.ru и зарегистрированы в наукометрической базе РИНЦ (Российский индекс научного цитирования).

УДК 620.9
ББК 31

ISBN 978-5-91646-467-2

СОДЕРЖАНИЕ

Ипполитова В. П., науч. рук. Иванов О. О. ПРИМЕНЕНИЕ УМНЫХ ДАТЧИКОВ И НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЙ ЗАО «ЗАВОД «КАРТОНТОЛЬ».....	7
Иванов О. О., Сафронов А. А. О НЕКОТОРЫХ МЕТОДАХ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ- СТОКСА НА ПРИМЕРЕ ГИДРОТУРБИН В ЭНЕРГЕТИКЕ.....	13
Злобин В. Г. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ХОЛОДА.....	20
Косов А. А., Праслов К. Д., науч. рук. Воюш Н. В. РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КЛИМАТА В ТЕПЛИЦЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТРОЛЛЕРА ПЛК-100.....	29
Суслов В. А. ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ ЗНАЧЕНИЙ СКОРОСТЕЙ РАСТВОРОВ РАЗНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ С МЕХАНИЧЕСКИМИ ПРИМЕСЯМИ.....	36
Хафизова М. М., науч. рук. Филина О. В. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ТОРФА В КАЧЕСТВЕ МЕСТНОГО ТОПЛИВА НА ТЭЦ В УСЛОВИЯХ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ.....	45
Иванов О. О. КРИТИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЫ L^2 – ОЦЕНОК В ТРЁХМЕРНЫХ УРАВНЕНИЯХ НАВЬЕ- СТОКСА: ПРЕПЯТСТВИЯ ДЛЯ ТЕПЛО-ГИДРАВЛИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕНАЖЁРНЫХ СИСТЕМ ОПЕРАТОРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК....	51
Пупкова Е. В., науч. рук. Дулесов А. С. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ ФАКТОРОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СЕТЕВОЙ СТРУКТУРЫ.....	61
Иванов О. О., Сафронов А. А. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ОТРЫВА ВИХРЕЙ В ПОТОКЕ НА ОСНОВЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА В МАТЛАВ.....	67
Поплавская П. С., науч. рук. Иванов О. О. УПРАВЛЕНИЕ ШАХТНЫМ ВЕНТИЛЯТОРОМ МЕСТНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ.....	76

Камалова И. И., науч. рук. Филина О. В. ОПТИМИЗАЦИЯ ТАРИФНОЙ ПОЛИТИКИ ПРЕДПРИЯТИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ ВОЛАТИЛЬНОСТИ ЦЕН НА ТОПЛИВО.	84
Ларченко И. Д., науч. рук. Гильц Н. Е. ИНДУСТРИЯ 4.0 В РОССИЙСКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ: ГОТОВНОСТЬ, ИНВЕСТИЦИИ И ВЛИЯНИЕ НА УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ. .	89
Липовская М. Р., науч. рук. Филина О. В. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА «ЗЕЛЕННОГО» И «ГОЛУБОГО» ВОДОРОДА ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОМПАНИИ. .	95
Khanov N. T., Academic Advisor Marzoeva I. V. IMPROVING THE RELIABILITY OF MICROENERGY GRIDS USING HYBRID STORAGE SYSTEMS.	100
Чистяков А. В., Бускин Р. В. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАЛЫХ МОДУЛЬНЫХ РЕАКТОРОВ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ТЕПЛА И ВОДОРОДА В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ РЕГИОНОВ С НЕУСТОЙЧИВОЙ НАГРУЗКОЙ	104
Чистяков А. В., Бускин Р. В. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС НА НАДЕЖНОСТЬ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА АТОМНОЙ СТАНЦИИ	110
Чистяков А. В., Бускин Р. В. ВЛИЯНИЕ ОБЩЕСТВЕННОГО ВОСПРИЯТИЯ РИСКА НА ВЫБОР ПЛОЩАДОК И СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ГЕНЕРАЦИИ В УСЛОВИЯХ ЭНЕРГОПЕРЕХОДА.	115
Хатилов Д. Р., науч. рук. Липидус А. А. ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВ В ТРАНСФОРМАТОРЕ	121
Ларионов Д. Н., Шарлаев А. С., науч. рук. Давлетбаев Р. С. ОКСИД ВАНАДИЯ (III) КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ: АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ.	125
Фролова Л. В., Конакова У. Н., науч. рук. Галкина М. И. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА В СТЕКОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	131
Султанова Р. Р., Гаврилов В. А. ВЫБОР СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АРХИТЕКТУРНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ И ДИНАМИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ СВЕТОВОЙ СРЕДЫ	141

Садыков Р. Д. науч. рук. Катасёва Д. В. АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА НА ПРОИЗВОДСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ.	145
Садыков Р. Д. науч. рук. Катасёва Д. В. ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ	150
Матиева А. П., Сандаков В. Д. ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТОВ И ГРАФИКОВ ОБХОДОВ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ДРОНОВ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. ...	156
Климаш Н. А., науч. рук. Бойков Л. М. ПЕРЕХОД К УНИВЕРСАЛЬНОЙ МЕТОДИКЕ ТЕПЛОВОГО РАСЧЁТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СУШКИ НА БДМ И КДМ	162
Шатохин А. А., науч. рук. Ремизова И. В. ИНТЕГРАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УПРАВЛЕНИЕ ЧПУ- СТАНКАМИ НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ	169
Сидельников В. И., Кокшаров А. В. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОДУКЦИИ	175
Gilyaziev A. R., Marzoeva I. V. PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF MODERN ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES	181
Мезенцева А. В. АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ПЕРЕХОДНОМ ПРОЦЕССЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ	186
Андреева Е. А., Смоленов А. Е., Попова Ю. В., Карасева И. Н. КАТАЛИЗАТОРЫ ПАРОВОЙ КОНВЕРСИИ МЕТАНА ДЛЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	191
Гареева С. Т., Сандаков В. Д. РОЛЬ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ДИАГНОСТИКЕ И ПРОФИЛАКТИКЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ	196
Рожков А. И., науч. рук. Никифоров Д. К. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАЮЩИХ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ	202
Шарафиева З. Ф., науч. рук. Любишев А. А. СОЗДАНИЕ ЕДИНОЙ ЦИФРОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ.	212
Кравчук А. А., науч. рук. Доманов В. И. РАЗБОР ВАРИАНТОВ ИСПОЛНЕНИЯ И ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВВОДА РЕЗЕРВА	217

Артемов А. И., Котов К. М., науч. рук. Отрубьянников Е. В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ОЦЕНКЕ РАБОТЫ ВЕТРОУСТАНОВОК С ПАРУСНЫМИ ЛОПАСТЯМИ	223
Якунькин М. И., науч. рук. Базин Д. А. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РЕАКТОРОВ КЛТ-40 ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	230
Иванов О. О. ИНТЕГРАЦИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДУЛЕЙ ОЦЕНКИ ДЕЙСТВИЙ ОПЕРАТОРОВ, ОБУЧАЕМЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MANIFOLD MUON ОПТИМИЗАЦИИ	236
Буймистрюк Г. Я. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ НЕПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИКИ И ФОТОНИКИ.	245
Садриев Р. Ф. науч. рук. Гильфанов К. Х. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМАХ ЭНЕРГЕТИКИ	253
Харисов А. Р., науч. рук. Сандаков В. Д. ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ	257
Широчин А. А., Жевнеров Я. В., Тюрин М. П., науч. рук. Воюш Н. В. СИСТЕМА ПРЕДИКТИВНОГО АНАЛИЗА. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ	263
Журова И. С. МАЛЫЕ МОДУЛЬНЫЕ РЕАКТОРЫ: СТРАТЕГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ В ТРАНСФОРМАЦИИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТИ	269
Расчислова С. А., Абдуллина А. А., науч. рук. Хамитова Д. В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В КАЧЕСТВЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ АЛЬТЕРНАТИВЫ ТРАДИЦИОННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ	275
Литвинюк А. М., науч. рук. Ляпин А. И. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. ...	281
Игнатов Е. А., науч. рук. Гонтовой С. В. СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ КОМФОРТА ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОКЛИМАТОМ ПОМЕЩЕНИЙ.	284
Иванова Е. И., науч. рук. Иванов О. О. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА КСВА 1800-170 КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКИ НА ЭНЕРГОБЛОКЕ №1, 2 АЭС «РУППУР»	290

ПРИМЕНЕНИЕ УМНЫХ ДАТЧИКОВ И НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЙ ЗАО «ЗАВОД «КАРТОНТОЛЬ»

студент **Ипполитова Валентина Павловна**,
науч. руководитель: аспирант, ассистент **Иванов Олег Олегович**,
Санкт-Петербургский государственный технический университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается применение нечетких регуляторов в сочетании с умными датчиками давления. Проведены натурные эксперименты, подтверждающие возможность снижения энергопотребления и повышения надежности работы системы. Результаты показывают перспективы интеграции умных датчиков и нечетких регуляторов в промышленное теплоснабжение. В статье рассматривается применение нечетких регуляторов в сочетании с умными датчиками давления для повышения энергоэффективности систем отопления на промышленном предприятии. Проведены натурные эксперименты, подтверждающие возможность снижения энергопотребления и повышения надежности работы системы. Результаты показывают перспективы интеграции умных датчиков и нечетких регуляторов в промышленное теплоснабжение.

Ключевые слова: умные датчики давления, нечеткий регулятор, энергоэффективность, система отопления, центробежный насос, частотный преобразователь, интеллектуальное управление, автоматизация, промышленное теплоснабжение.

APPLICATION OF SMART SENSORS AND FUZZY CONTROLLERS TO ENHANCE THE ENERGY EFFICIENCY OF BUILDING HEATING SYSTEMS AT THE «KARTONTOL PLANT»

Student **Ippolitova Valentina Pavlovna**,
Academic Advisor: Postgraduate Student, Assistant **Ivanov Oleg Olegovich**,
Saint Petersburg State Technical University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Power Engineering,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. This paper explores the application of fuzzy controllers combined with smart pressure sensors for enhancing the energy efficiency and reliability of industrial heating systems. Field experiments conducted confirm the potential for reducing energy consumption while improving system stability and operational reliability. The results demonstrate promising prospects for integrating smart sensors

and fuzzy logic controllers in industrial heating applications.

Keywords: smart pressure sensors, fuzzy controller, energy efficiency, heating system, centrifugal pump, frequency converter, intelligent control, automation, industrial heating.

Введение

Современные системы отопления промышленных предприятий предъявляют высокие требования к точности поддержания технологических параметров и энергоэффективности. Наиболее актуальным решением для автоматизации работы контуров отопления становятся центробежные насосы, оснащённые интеллектуальными датчиками давления и цифровыми системами управления на базе частотных преобразователей. Исследование, проведённое на ЗАО «Завод «Картонтоль», посвящено анализу, экспериментации и алгоритмизации процессов работы насосной установки с использованием умных сенсоров и нечеткой логики [1].

Работа замкнутой системы отопления

В системе отопления предприятием «Картонтоль» поддерживается замкнутый контур: два котла, циркуляционные насосы, распределительный и обратный коллекторы. Специально разработанная авторами функциональная схема контура (рис. 1) позволяет выявить все основные точки контроля и регулирования давления, что является ключевым для предотвращения аварий и повышения ресурсной эффективности.

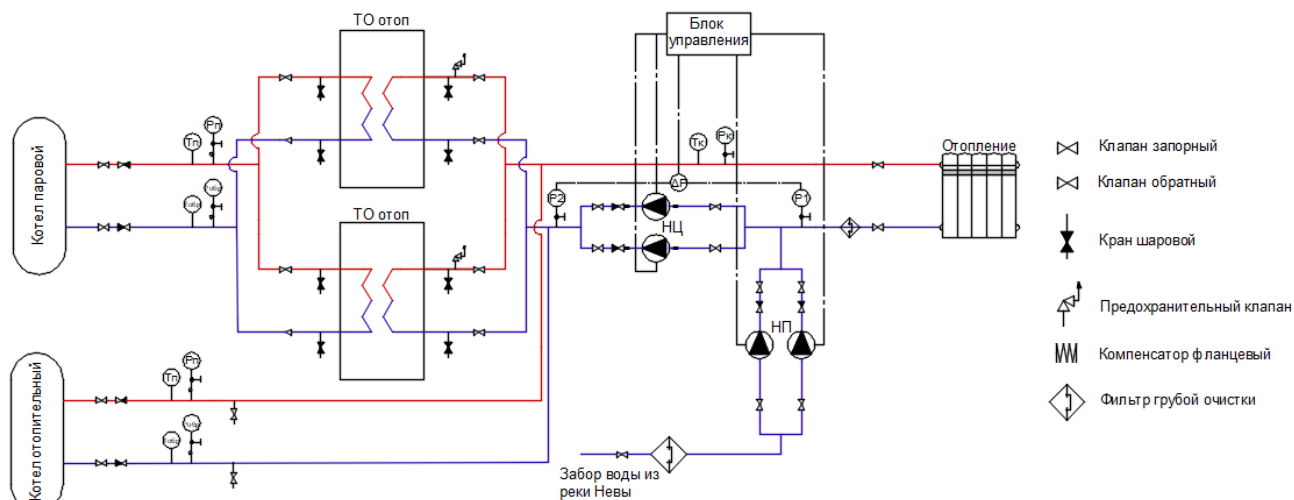


Рисунок 1. Функциональная схема контура системы отопления

Умный датчик давления: принципы и роль

Интеллектуальный датчик давления подключён к всасывающему и напорному участку системы. Его основная задача – непрерывно фиксировать действующее давление, фильтруя помехи при помощи встроенных цифровых алгоритмов (скользящее среднее, медианный фильтр). Такой датчик демонстрирует стабильную работу при высоких гидравлических нагрузках, игнорирует кратковременные скачки и выдаёт управляемый сигнал в систему автоматизации [2].

Полученные данные и натурные эксперименты

В ходе натурных испытаний на предприятии проводились замеры в различных режимах работы системы отопления и насосной станции. Было выявлено, что умный датчик эффективно фиксирует скачки давления, возникающие при перепуске теплоносителя, переходных процессах или нештатных операциях оборудования [3]. Благодаря фильтру сигнала ложные тревоги полностью отсутствуют, производится только реакция на существенные отклонения (рис. 2).

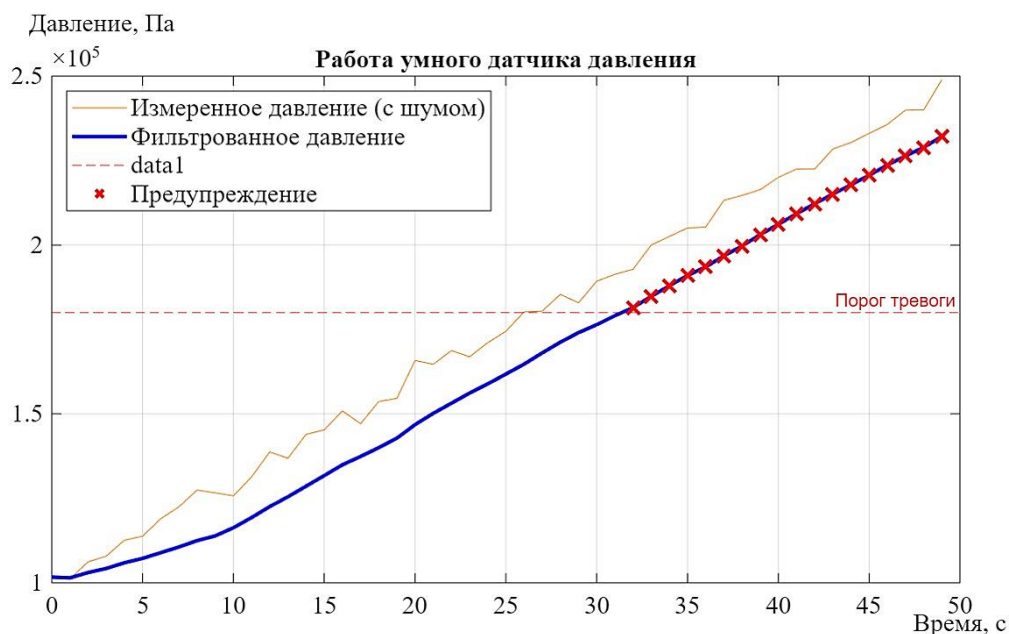


Рисунок 2. Работа умного датчика

Разработка и реализация нечеткого регулятора

Для повышения стабильности работы насосной установки разработан нечеткий регулятор скорости вращения с применением Fuzzy Logic Toolbox (MATLAB). Регулятор использует два входных сигнала: текущее давление и скорость его изменения. На основе языковых правил (например: «Если давление высокое и быстро растёт, то снизить обороты насоса») система принимает решения о регулировке скорости, обеспечивая мягкую адаптацию к реальным процессам [4].

Экспертный анализ показал, что при внедрении нечеткого регулятора реакция насосной станции на долговременные скачки давления становится быстрой и точной, оборудование защищено от гидроударов, а энергопотребление снижается до 15 % по сравнению с традиционной управляемой системой. Визуализация результатов в виде трёхмерной поверхности вывода и графиков функций принадлежности позволяет корректировать параметры регулятора под индивидуальные сценарии.

На представленном графике на рисунке 3 показана динамика работы системы с нечетким регулятором скорости, реагирующим на скачок давления в контуре отопления. Синяя линия отображает изменение давления в системе (в барах), а красная линия – скорость вращения насоса (в об/мин).

В области около 10 секунд наблюдается резкий скачок давления – это типичный пример нештатной ситуации: возможно, внезапно открывшийся или закрывшийся клапан, скачок потребления или гидроудар. Умный датчик фиксирует этот скачок, а встроенный фильтр устраняет кратковременные шумовые выбросы, оставляя только реальное отклонение [5].

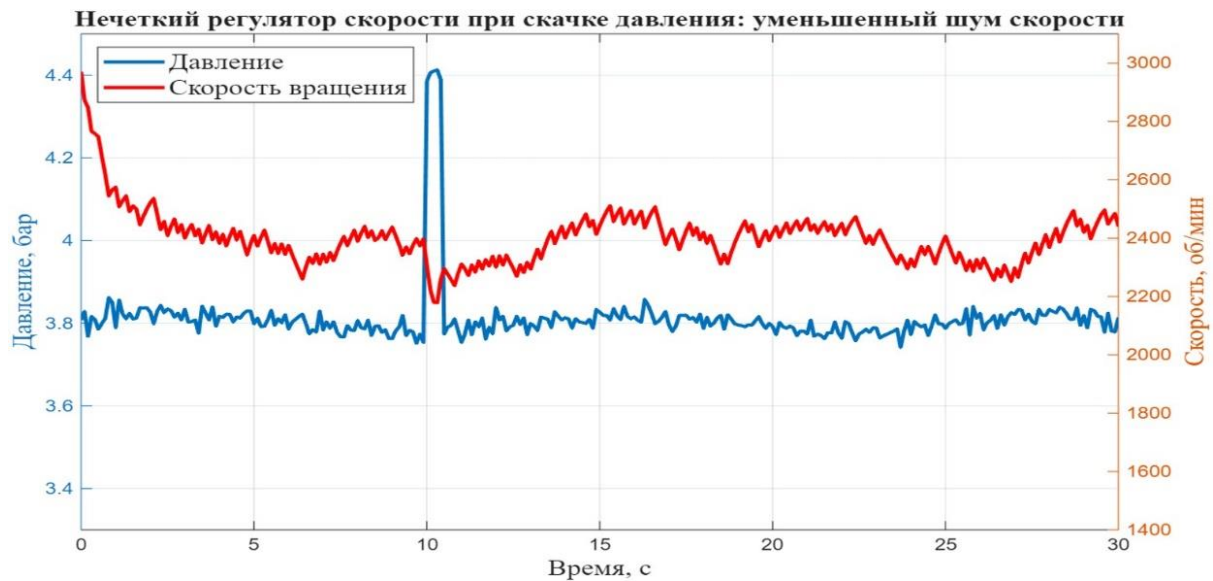


Рисунок 3. Динамика работы системы с нечетким регулятором

На рисунке 4 представлена ключевая часть нечеткой системы управления скоростью насоса на основе умного датчика давления.

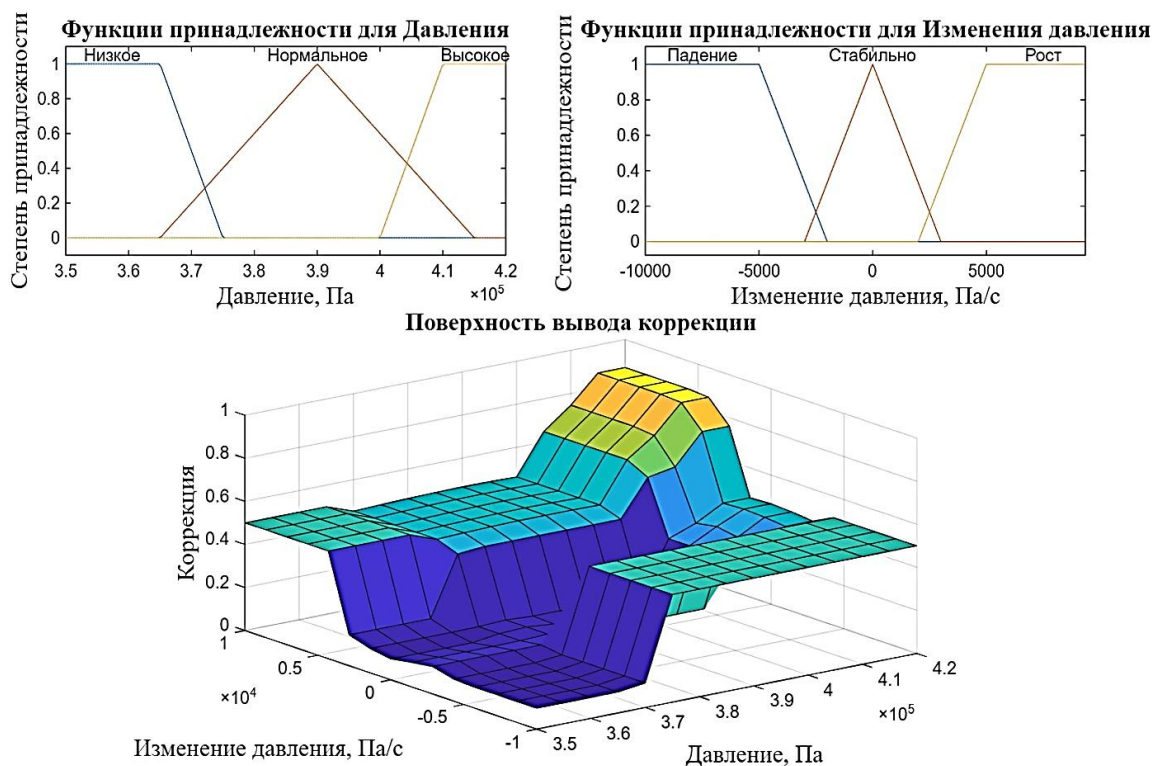


Рисунок 4. Часть нечеткой системы управления скоростью насоса на основе умного датчика давления

Визуализация состоит из верхних графиков функций принадлежности для входных переменных («Давление» и «Изменение давления») и нижней трёхмерной поверхности вывода регулятора («Коррекция»).

В левом верхнем графике изображены функции принадлежности для лингвистических переменных «Давление»: «Низкое», «Нормальное» и «Высокое». Они задают, насколько текущее значение давления соответствует каждому из терминов, обеспечивая плавный переход между областями регулирования без жёстких границ.

Правый верхний график показывает функции принадлежности для скорости изменения давления: «Падение», «Стабильно», «Рост». Такой подход позволяет нечеткой системе гибко реагировать не только на абсолютное значение давления, но и на характер его изменения (например, на резкие скачки или медленное повышение).

Внизу расположена трехмерная поверхность вывода регулятора, которая отображает итоговую степень коррекции управления в зависимости от двух входных параметров – давления и его изменения. По этой поверхности система формирует управляющее воздействие на частотный преобразователь: при сочетании высокого давления и быстрого роста коррекция максимальна (ускоренное снижение оборотов), при низком и стабильно падающем давлении коррекция практически отсутствует (скорость сохраняется) [6].

Данная визуализация наглядно демонстрирует структуру и принцип работы нечеткого регулятора, обеспечивая адаптивную и устойчивую реакцию насосной системы предприятия на переменные нагрузки и нештатные ситуации. Внедрение нейросетевых технологий в существующую систему отопления предприятия включает несколько поэтапных шагов:

1. Анализ и подготовка данных:

- организация непрерывного сбора исторических данных с умных датчиков давления, температуры, скорости насосов и режимов управления;
- очистка, фильтрация и структурирование данных для использования при обучении нейронных сетей.

2. Оценка архитектуры системы:

- определение точек интеграции: какие процессы или этапы управления (например, корректировка скорости насоса, диагностика, прогнозирование аварий) будут автоматизированы;
- подготовка аппаратной инфраструктуры для проведения вычислений и обмена информацией между датчиками, контроллерами и сервером нейросети.

Заключение

Комбинация умных датчиков давления с цифровой фильтрацией сигнала и адаптивным нечетким регулятором обеспечивает современный уровень автоматизации и безопасности отопительных систем промышленных объектов. Практические эксперименты на ЗАО «Завод «Картонтоль» подтверждают эффективность подхода: повышение надёжности, снижение эксплуатационных расходов, предотвращение аварий и возможность тонкой настройки оборудования.

Список литературы:

1. Глебов, В. В. Технология насосных систем промышленных предприятий / В. В. Глебов. – Москва: Машиностроение, 2017. – 256 с. – Текст: непосредственный.
2. Кирсанов, С. К. Моделирование и автоматизация тепловых потоков: теория и практика применения / С. К. Кирсанов. – Санкт-Петербург: Питер, 2022. – 320 с. – Текст: непосредственный.
3. Руководство по эксплуатации умных промышленных датчиков давления серии PTE5000, ООО «Техноэлектроника», 2019.
4. MATLAB Fuzzy Logic Toolbox. Руководство пользователя. – MathWorks, 2023.
5. Ковалев, Д. А. Моделирование системы автоматического управления мощностью энергоблока при изменении общей нагрузки энергосистемы / Д. А. Ковалев, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2022. – № 1. – С. 122-129. – DOI 10.46418/2079-8199_2022_1_19. – EDN RGFHOC.
6. Попов, А. А. Энергосберегающие технологии и частотное регулирование насосных агрегатов / А. А. Попов. – Текст: непосредственный // Инженерные системы. – 2020. – № 2. – С. 24–29.

© Ипполитова В. П., 2025

О НЕКОТОРЫХ МЕТОДАХ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА НА ПРИМЕРЕ ГИДРОТУРБИН В ЭНЕРГЕТИКЕ

аспирант, ассистент **Иванов Олег Олегович**,
член-корреспондент РАН, д-р техн. наук, профессор
Сафронов Алексей Анатольевич,
Санкт-Петербургский государственный технический университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В данной работе изучаются вопросы поведения жидкостных потоков гидротурбин в энергетике. Приводится математическая постановка задачи: описаны основные операторы векторного анализа, приведены уравнения Навье-Стокса в криволинейных координатах, реализованы модели течения жидкости в декартовых координатах. Исследованы режимы течения жидкости при различных числах Рейнольдса.

Ключевые слова: уравнения Навье-Стокса в криволинейных координатах, число Рейнольдса, моделирование в Matlab.

SOME METHODS OF INVESTIGATION OF SOLUTIONS OF NAVIER-STOKES EQUATIONS ON THE EXAMPLE OF HYDRAULIC TURBINES IN POWER ENGINEERING

Postgraduate Student, Assistant **Ivanov Oleg Olegovich**,
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor in Technology,
Professor **Alexey Anatolyevich Safronov**,
Saint Petersburg State Technical University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Power Engineering,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. This paper studies the issues of fluid flow behavior of hydraulic turbines in power engineering. The mathematical formulation of the problem is given: the basic operators of vector analysis are described, the Navier-Stokes equations in curvilinear coordinates are given, models of fluid flow in Cartesian coordinates are realized. The fluid flow regimes at different Reynolds numbers are investigated.

Keywords: Navier-Stokes equations in curvilinear coordinates, Reynolds number, modeling in Matlab.

В современной энергетике одной из основных задач гидравлических электростанций является обеспечение бесперебойной электроэнергией потребителей. При изменении нагрузки система и входящие в ее состав гидроагрегаты испытывают переходные нерасчетные режимы работы. Для гидротурбин порой это означает, что потоки жидкости становятся нестабильными, возникают турбулентные течения. Как следствие, возникают низкочастотные гидродинамические пульсации. Они очень плохо сказываются на состоянии гидротурбин, которые являются очень чувствительным оборудованием.

В работе [1] детально описаны вихревые явления в гидротурбинах. Проблемы в закрученных потоках появляются и в работах [2] и [3].

Этапы моделирования жидкостных потоков были описаны при исследовании турбины Holleforsen в рамках известного проекта Turbine-99. Этому посвящена работа [4].

Вопросы математического описания подобных задач приводятся в работе [5]. Многие геометрические выкладки доказываются, используя литературу [6]. Уравнения Навье-Стокса хорошо описаны в [7].

В работе [8] рассматриваются уравнения гидродинамики на двумерных многообразиях, доказываются теоремы о существовании и единственности обобщенных решений стационарных и нестационарных задач.

В своих работах ([9], [10]) В. И. Арнольд нашел очень красивые связи гидродинамики и геометрии диффеоморфизмов в $L_2(M)$, сохраняющих меру объема, что плодотворно сказалось на развитии вычислительной и теоретической гидродинамики.

Математическое описание задачи

В евклидовом пространстве $\mathbb{R}^n$ всегда имеется стандартная система координат $(x^1, \dots, x^n)$ и стандартная евклидова метрика. Рассмотрим некоторое гладкое M^{n-1} $(n-1)$ -мерное многообразие, заданное, к примеру, как поверхность. Без ограничения общности можно считать, что поверхность задана радиус-вектором (рис. 1):

$$r = r(u^1, \dots, u^{n-1}), \text{ или в декартовых координатах } x^i = x^i(u), u \in D \subset \mathbb{R}^{n-1}.$$

Мы изначально предположили поверхность M^{n-1} гладкой, поэтому:

$$\text{ранг} \left(\frac{\partial x^i}{\partial u_j} \right) = n - 1, \text{ где } 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n - 1.$$

Индукционная риманова метрика на M^{n-1} определяется так:

$$dS^2(M^{n-1}) = dS^2(\mathbb{R}^n)|_{M^{n-1}}.$$

Тогда можно записать вид стандартной евклидовой метрики в $\mathbb{R}^n$ и ограничить ее на поверхность M^{n-1} :

$$dS^2(\mathbb{R}^n) = \sum_1^n (dx^i)^2 = \sum_{i,\alpha} \left(\frac{\partial x^i}{\partial u_\alpha} \cdot du^\alpha \right)^2 =$$

$$= \sum_{\alpha, \beta} \sum_i \left[\frac{\partial x^i}{\partial u_\alpha} \cdot \frac{\partial x^i}{\partial u_\beta} \cdot du^\alpha \cdot du^\beta \right] = g_{\alpha\beta}(u) du^\alpha \cdot du^\beta, \quad (1)$$

где $g_{\alpha\beta}(u)$ – компоненты метрического тензора, т. е. компоненты всевозможных скалярных произведений касательных векторов $\alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}$ к поверхности M^{n-1} .

$$g_{\alpha\beta} = \langle \alpha_\alpha \cdot \alpha_\beta \rangle,$$

$$\alpha_j = \frac{\partial x^i}{\partial u_j}, 1 \leq j \leq n-1; 1 \leq i \leq n,$$

где $\langle \cdot \rangle$ – евклидово скалярное произведение векторов.

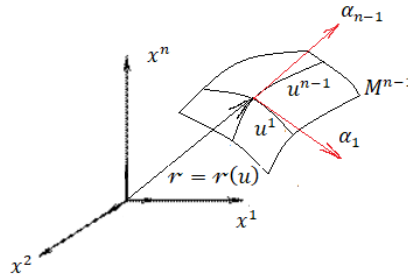


Рисунок 1. Гладкое M^{n-1} $(n-1)$ -мерное многообразие в $\mathbb{R}^n$

Выражение (1) является явным выражением первой квадратичной формы поверхности (метрики).

Уравнения Навье-Стокса описывают движения вязкой ньютоновской несжимаемой жидкости. Изучение уравнений имеет огромный потенциал для развития гидродинамики и теплопередачи.

Рассмотрим некоторое гладкое M^2 двумерное многообразие, заданное, к примеру, как поверхность в $\mathbb{R}^3$, в него гладко вложена. Без ограничения общности можно считать, что поверхность задана радиус вектором $r = r(u^1, u^2)$. Поэтому u^1, u^2 – это локальные криволинейные координаты на поверхности. Значит, поверхность снабжена индуцированной метрикой (1).

Тогда уравнения Навье-Стокса на этой поверхности имеют вид:

$$\partial_t v + \nabla_v v - \nu \Delta v + \text{grad}(p) = f,$$

А уравнение неразрывности:

$$\text{div}(v) = 0,$$

где $\text{div}(v)$ – дивергенция векторного поля v (скорости) в криволинейных координатах u^1, u^2 ; $\text{grad}(p)$ – градиент функции p (давления) в криволинейных координатах u^1, u^2 ; $\nabla_v v = v^j \left(\frac{\partial v^k}{\partial u_j} + \Gamma_{ij}^k v^j \right) \alpha_k$ – ковариантная производная вектора v вдоль него самого; Γ_{ij}^k – компоненты связности (символы Кристоффеля), которые определяются через производные компонент метрического тензора. Они являются некоторыми гладкими функциями от координат, поэтому не образуют тензор; ν – коэффициент динамической вязкости; f – сила, действующая на жидкость; Δ – оператор Лапласа в криволинейных координатах u^1, u^2 .

Для стандартной ортогональной системы координат запишем уравнения Навье-Стокса, когда на жидкость не действуют силы.

$$\partial_t v + (v \cdot \nabla) v = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta^2 v.$$

Распишем вектор $v = (v_x, v_y)$, найдем его производные и, добавив уравнение неразрывности и давления в форме Пуассона, окончательно имеем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} &= -\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{\partial v_x}{\partial x} + 2 \frac{\partial v_x}{\partial y} \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \frac{\partial v_y}{\partial y} \right). \end{aligned}$$

В этих уравнениях плотность ρ и динамическая вязкость ν являются константами, но в общем случае их нельзя выносить из-под знака производной ввиду их зависимости от температуры.

Рассмотрим квадрат как область $\Omega \subset \mathbb{R}^2$.

$$\Omega = (x, y) \in \mathbb{R}^2 : 0 \leq x, y \leq 2.$$

Далее, пусть в начальный момент времени вектор скорости $v = (v_x, v_y)$ на верхней части квадрата, задаваемой уравнением $y = 2$, отличен от нуля, а на оставшейся части границы квадрата $x = 0, 2$ и $y = 0$ жидкость не двигалась.

Вид безразмерных уравнений Навье-Стокса приведен ниже. Ниже проводится моделирование для разных чисел Рейнольдса.

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + (v_x \cdot \nabla) v_x &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + Re^{-1} \Delta^2 v_x, \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + (v_y \cdot \nabla) v_y &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + Re^{-1} \Delta^2 v_y. \end{aligned}$$

Теперь перейдем к моделированию.

Моделирование уравнений Навье-Стокса при помощи численных методов

Результаты моделирования движения жидкости в области Ω приведены на рисунке 2. Видно, что вязкость оказывает значительное влияние на распределение слоев жидкости и скоростей. Эти физические эффекты хорошо отражаются уравнениями Навье-Стокса и удачно моделируются.

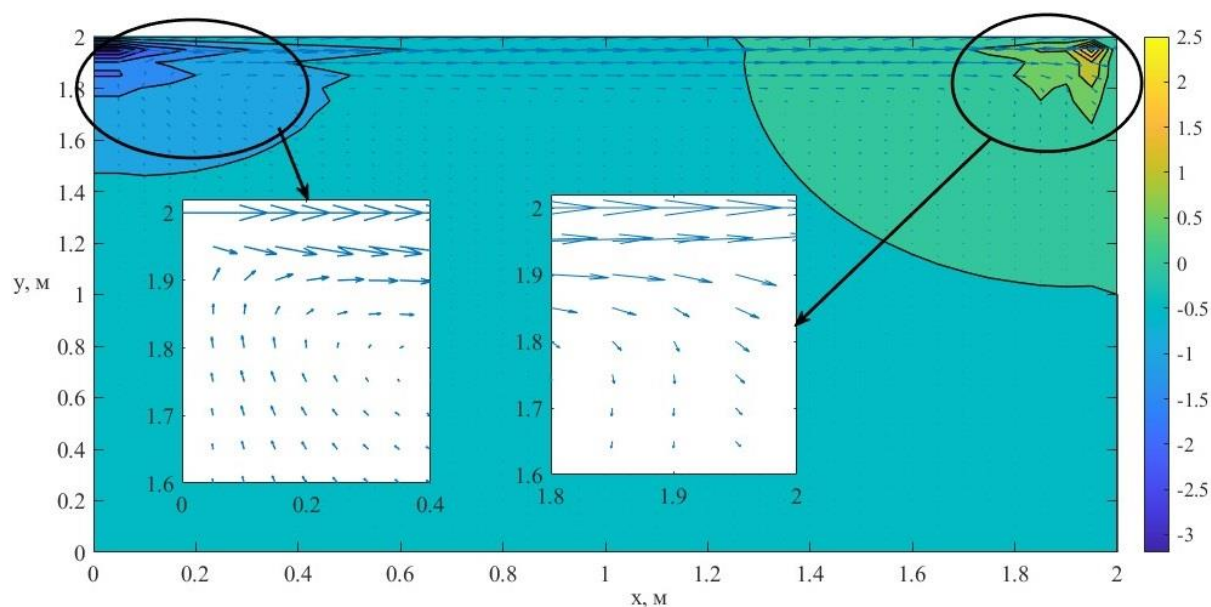


Рисунок 2. Распределение скорости и давления в области Ω

Для моделирования стационарных течений в плоских геометриях уравнения Навье-Стокса подходят как нельзя лучше. Сразу видна четкая зависимость: скорость течения максимальна в центре потока и минимальна на краях. Это демонстрирует рисунок 3.

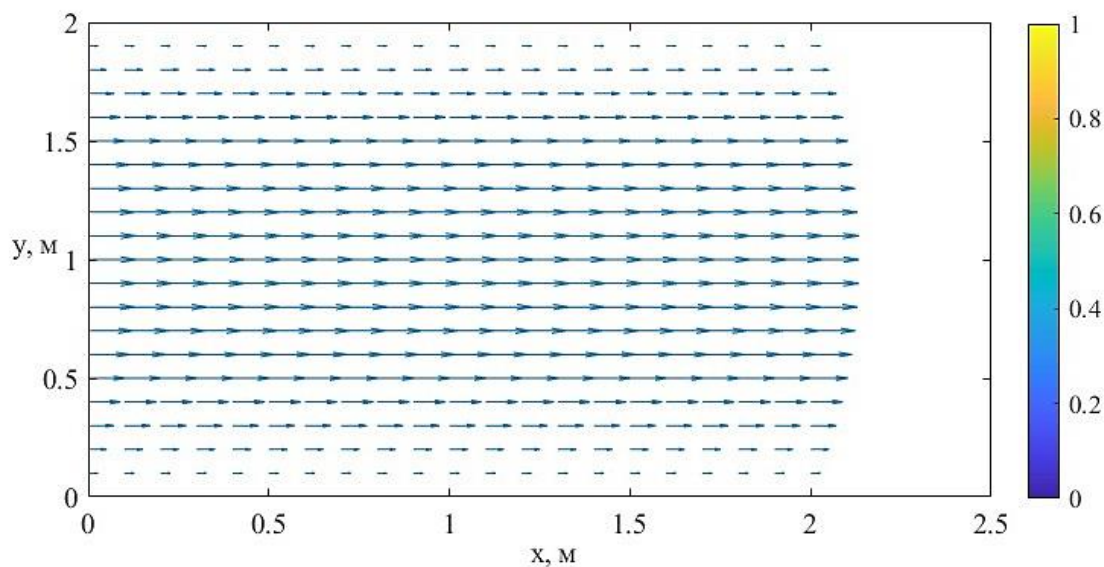


Рисунок 3. Распределение скорости стационарного потока

Графики скоростей и давлений для безразмерных уравнений Навье-Стокса при различных числах Рейнольдса изобразим на рисунке 4.

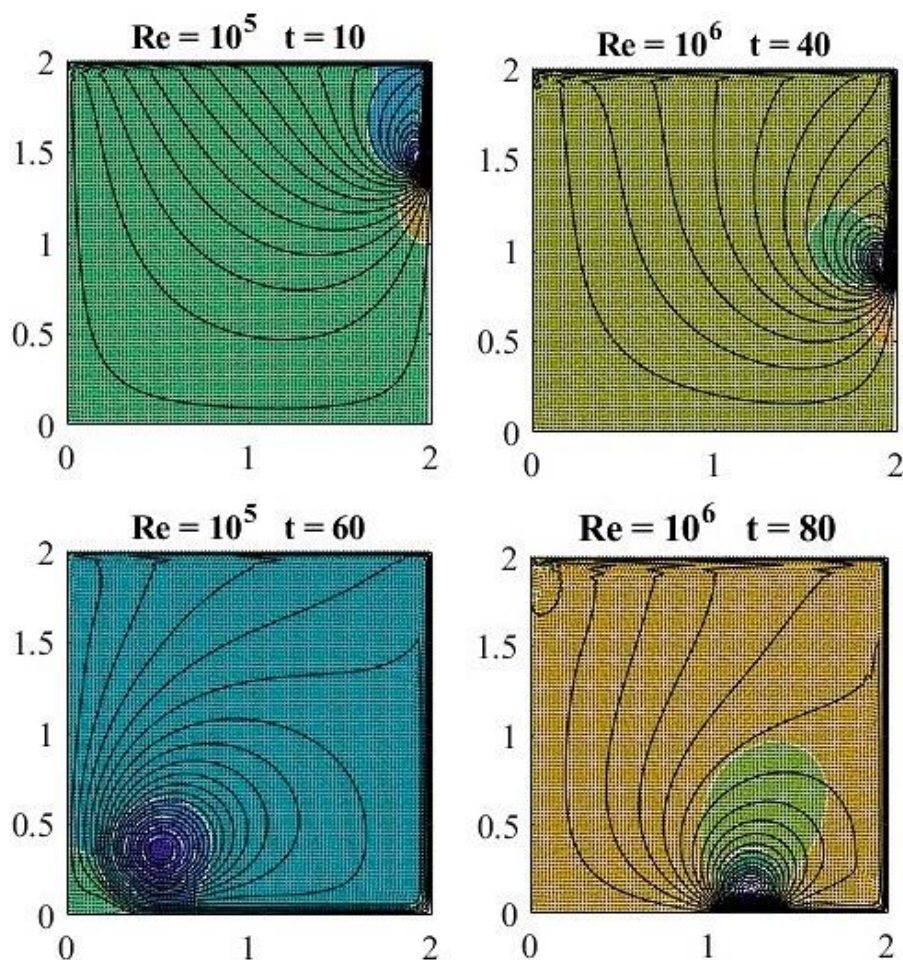


Рисунок 4. Поведение жидкости при различных числах Рейнольдса в разные моменты времени

Заключение

Моделирование и исследование уравнений Навье-Стокса даже в простых формах позволяет достоверно моделировать потоки жидкости.

В данной работе приведены изображения жидкостных потоков как для стационарных и ламинарных течений, так и течений с различными числами Рейнольдса.

Такие модели могут внести вклад в исследование режимов работы гидроагрегатов для объектов современной энергетики.

Список литературы:

1. Deriaz P. A. Contribution to the understanding of flow in draft tubes of francis turbines // International Association for Hydraulic Research, Hydraulic Machinery and Equipment Symp., France, Nice, Sept. 1960.
2. Гупта, А. Закрученные потоки: перевод с английского / А. Гупта, Д. Лили, Н. Сайред; под редакцией В. Я. Лихущина. – Москва: Мир, 1987. – 588 с. – Текст: непосредственный.
3. Алексеенко, С. В. Введение в теорию концентрированных вихрей / С. В. Алексеенко, П. А. Куйбин, В. Л. Окулов; Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003. —

504 с. – Текст: непосредственный.

4. Анализ RANS моделей турбулентности на примере расчета стационарного течения в отсасывающей трубе гидротурбины Turbine-99 / А. В. Сентябов, А. А. Гаврилов, А. А. Дектерев, А. В. Минаков. – Текст: непосредственный // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т. 6, № 1. – С. 86–93. – DOI: 10.7242/1999-6691/2013.6.1.11.

5. Ладыженская, О. А. Математические вопросы динамики вязкой несжимаемой жидкости / О. А. Ладыженская. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Наука, 1970. – 288 с. – Текст: непосредственный.

6. Дубровин, В. А. Современная геометрия. Методы и приложения / В. А. Дубровин, С. П. Новиков, А. Т. Фоменко. – 2-е изд., перераб. – Москва: Наука, 1986. – 760 с. – Текст: непосредственный.

7. Temam, R. Navier–Stokes equations and nonlinear functional analysis / R. Temam. – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1983. – 122 p. – Text: unmediated.

8. Ильин, А. А. Уравнения Навье–Стокса и Эйлера на двумерных замкнутых многообразиях / А. А. Ильин. – Текст: непосредственный // Математический сборник. – 1990. – Т. 181, № 4. – С. 521–539.

9. Arnold, V. I. Sur la géométrie différentielle des groupes de Lie de dimension infinie et ses applications à l'hydrodynamique des fluides parfaits / V. I. Arnold. – Text: unmediated // Annales de l'Institut Fourier. – 1966. – Vol. 16, no. 1. – P. 319–361.

10. Arnold, V. I. Topological Methods in Hydrodynamics / V. I. Arnold, B. A. Khesin. – New York: Springer-Verlag, 1998. – 374 p. – Text: unmediated.

© Иванов О. О., Сафронов А. А., 2025

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ХОЛОДА

канд. техн. наук, доцент **Злобин Владимир Германович**,
Санкт-Петербургский государственный технический университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматриваются физические основы применения термоэлектричества в промышленной энергетике для получения холода. Указаны области применения термоэлектрического метода получения холода, примеры использования, их преимущества и недостатки. Рассмотрена физическая природа эффектов термоэлектричества, в частности, эффект *Пельтье*. Рассмотрены схема и принцип действия термоэлектрического охлаждающего элемента.

Ключевые слова: термоэлектричество, контактные явления, термо-э.д.с., эффект Пельтье, термоэлектрический холодильник, термодинамические явления.

THERMOELECTRIC METHODS OF PRODUCING COLD

PhD in Technology, Associate Professor **Zlobin Vladimir Germanovich**,
Saint Petersburg State Technical University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Power Engineering,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper discusses the physical basis of the application of thermoelectricity in industrial energy for cold production. The fields of application of the thermoelectric method of obtaining cold, examples of use, their advantages and disadvantages are indicated. The physical nature of the effects of thermoelectricity, in particular, the Peltier effect, is considered. The scheme and principle of operation of a thermoelectric cooling element are considered.

Keywords: thermoelectricity, contact phenomena, thermoelectric effect, Peltier effect, thermoelectric refrigerator, thermodynamic phenomena.

Введение

Физическая природа термоэлектрического эффекта состоит в том, что средняя энергия свободных электронов различна в разных проводниках и по-разному растет с увеличением температуры. В проводниках, имеющих продольный перепад температур, возникает направленный поток электронов от горячего спая к холодному. При этом у холодного спая образуется избыток отрицательных зарядов, у горячего – избыток положительных. Поток электронов будет более интенсивным в тех проводниках, у которых концентрация электронов

больше. Если использовать проводники с разной концентрацией электронов и поддерживать разную температуру спаев, на концах термоэлемента появится термо-Э.Д.С.

Однако, мало кто знает, что эффекты термоэлектричества – *Зеебека*, *Пельтье* и *Томсона* – обратимы. Учитывая гигантское развитие электроники в промышленности, важно отметить высокую актуальность решения проблемы получения холода для термостатирования элементов электронных устройств. Задача статьи – ознакомить с возможностями использования термоэлектрических методов для получения холода. Предметом исследования в данной работе является эффект *Пельтье* и его закономерности при получении холода.

Элементы *Пельтье* применяются в ситуациях, когда необходимо охлаждение с небольшой разницей температур, или энергетическая эффективность охладителя не важна. Например, элементы *Пельтье* применяются в маленьких автомобильных холодильниках, так как применение компрессора в этом случае невозможно из-за ограниченных размеров и, кроме того, необходимая мощность охлаждения невелика.

Кроме того, элементы *Пельтье* применяются для охлаждения устройств с зарядовой связью в цифровых фотокамерах. За счёт этого достигается заметное уменьшение теплового шума при длительных экспозициях (например, в астрофотографии). Многоступенчатые элементы *Пельтье* применяются для охлаждения приемников излучения в инфракрасных сенсорах.

Также элементы *Пельтье* часто применяются [1, 6]:

- для охлаждения и термостатирования диодных лазеров, чтобы стабилизировать длину волны излучения;
- в компьютерной технике;
- в радиоэлектрических устройствах;
- в медицинском и фармацевтическом оборудовании;
- в бытовой технике;
- в климатическом оборудовании;
- в термостатах;
- в оптической аппаратуре;
- для управления процессом кристаллизации
- как подогрев в целях отопления;
- для охлаждения напитков;
- в лабораторных и научных приборах;
- в ледогенераторах;
- в кондиционерах;
- для получения электроэнергии;
- в электронных счётчиках расхода воды.

Конечно, охлаждающие устройства *Пельтье* вряд ли подходят для массового использования. Они достаточно дорогие и требуют правильного режима эксплуатации. Сегодня это, скорее, инструмент для любителей разгона процессоров. Однако в случае необходимости сильного охлаждения процессоров кулеры *Пельтье* являются наиболее эффективными устройствами.

Материалы и методы

Таким образом, важные преимущества термоэлектрического метода получения холода в сравнении с другими типами охлаждения обусловили широкую сферу применения этого метода.

В зависимости от холодопроизводительности можно выделить три класса использования термоэлектрических холодильных машин [2, 7]:

1. *Маломощные охладители* ($Q_0 < 100$ Вт). Подавляющее число термоэлектрических холодильников относятся именно к этому классу. С экономической точки зрения при таких мощностях они сравнимы с компрессионными машинами.

2. *Термоэлектрические холодильники средней мощности* ($100 < Q_0 < 500$ Вт). При таких мощностях экономическая эффективность термоэлектрических холодильников, как правило, ниже, чем компрессионных.

3. *Высокомощные охладители* ($Q_0 > 500$ Вт). Применение термоэлектрических холодильников для создания таких мощностей может быть оправдано при выполнении каких-либо специфических требований, таких как повышенные требования к весу, размерам, устойчивости к перегрузкам, необходимости автономной работы и т. п. Например, в США разработана термоэлектрическая микроклиматическая установка для пилотов вертолёт с $Q_0 = 1$ кВт.

К *термоэлектрическим холодильникам потребительского назначения* относятся портативные пикник-боксы, переносные домашние холодильники, охладители для напитков (соков, вина), стационарные охладители-фильтры воды, нагреватели-охладители детского питания, холодильники для гостиничных номеров (рис. 1).

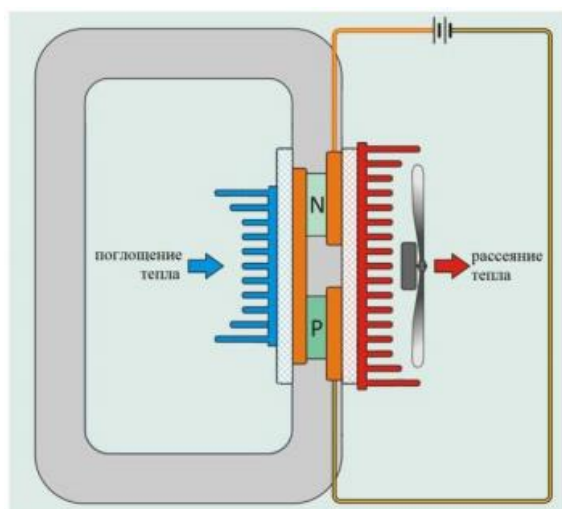


Рисунок 1. Пример использования термоэлектрических охладителей в быту

Использование постоянного тока делает очень удобным *применение термоэлектрических охладителей на транспорте*. Разработаны автомобильные мини-холодильники, автомобили с термостатированным кузовом, охладители автомобильных сидений и мотоциклетных шлемов, охладители питьевой воды для самолётов и пассажирских железнодорожных вагонов.

Созданы термоэлектрические блоки для кондиционеров на поездах шведских и французских железных дорог. Проходят испытания термоэлектрические кондиционеры на российских железных дорогах. Представляются весьма перспективными автомобильные локальные кондиционеры для комфортного охлаждения водителя или одного пассажира.

Использование термоэлектрического охлаждения *в промышленности и системах телекоммуникаций* – это управление температурными процессами, в том числе точное поддержание температуры различных электронных блоков, жесткая защита критических систем от внешних тепловых воздействий, термостатирование микропроцессоров вычислительных систем и систем автоматики, охлаждение волоконно-оптических систем и лазерных диодов с целью стабилизации их параметров (рис. 2).

На предприятиях торговли и питания используются охлаждаемые бары для напитков и охлаждаемые витрины, устройства для охлаждения и взбивания масла, мороженого и сливок, индивидуальные порционные охладители блюд, охладители молока и т. п.

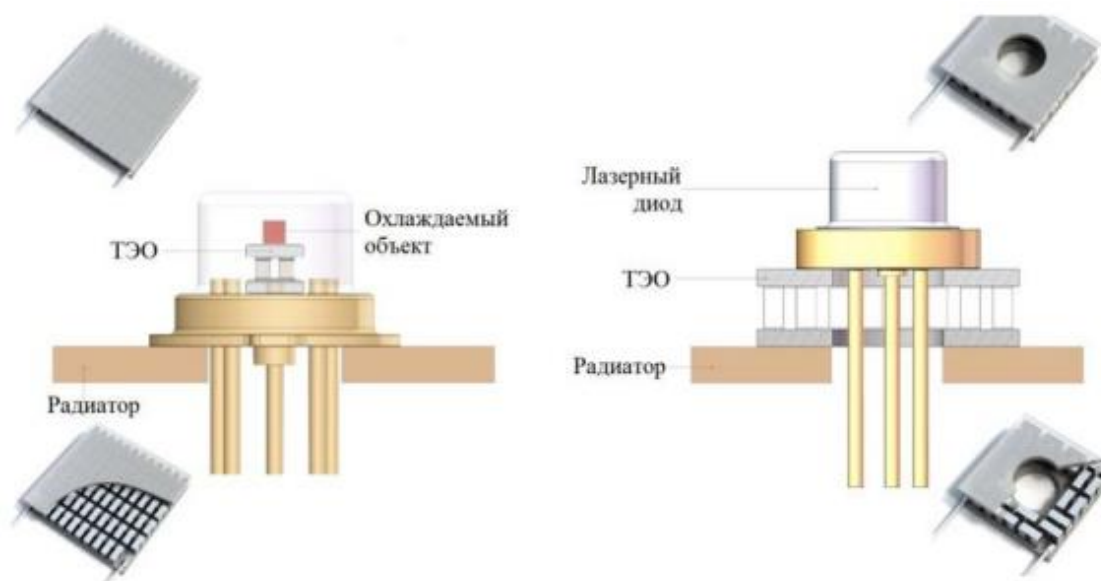


Рисунок 2. Пример использования термоэлектрических охладителей в технике

Применение термоэлектрического охлаждения *в медицине*. Это приборы для анализа крови, стационарные и переносные холодильники для лекарств, в том числе домашние охладители инсулина, оборудование для препарирования и хранения тканей, биостимуляторы, криогенные пинцеты для офтальмологии, криогенные скальпели, охлаждаемые предметные столики для микроскопов, охлаждаемые подложки для зубоврачебного цемента, термостатированные терапевтические одеяла, персональные больничные холодильники.

Далеко не полный список *лабораторного и научного оборудования* с использованием термоэлектрических охладителей включает: охлаждаемые инфракрасные детекторы, рефрактометры, лазерные коллиматоры, фотоумножители, ПЗС матрицы, интегральные схемы, электронные платы, спектрофотометры, термопрограмматоры, охлаждаемые камеры и мешалки,

детекторы точки замерзания и точки росы, эталоны абсолютно черного тела, ячейки для электрофореза, осмометры, анализаторы загрязнения воздуха, приборы определения температуры застывания нефти.

Другие примеры применения термоэлектрического охлаждения можно найти в литературе [4].

Эффект *Пельтье* обратим, поскольку направление теплового потока зависит от направления, протекающего через термопару тока. Тепловой поток может передаваться от холодной стороны термопары к горячей и, следовательно, термопара может работать как холодильник или тепловой насос. Как количество тепла может быть передано в этом случае? Для упрощения задачи предположим, что α , R и Λ не зависят от температуры.

Пусть имеется некоторая батарея из термопар, для которой параметры α , R и Λ известны. Предположим, например, что $\alpha = 0,055$ В/К, $R = 4,2$ Ом, $\Lambda = 0,25$ Вт/К. Предположим также, что тепловой поток направлен от стенки с температурой $T_C = 278$ К к стенке с температурой $T_H = 338$ К. В этом случае $\Delta T = 60$ К.

Пусть P_C – тепловая мощность, отнимаемая от холодного резервуара,

$$P_C = -\Lambda \cdot \Delta T + \alpha \cdot T_C \cdot I - \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2. \quad (1)$$

В данном случае

$$P_C = 15,0 + 15,29 \cdot I - 2,1 \cdot I^2. \quad (2)$$

Количество электрической энергии, требуемой для осуществления этого процесса:

$$P_C = \alpha \cdot \Delta T \cdot I + R \cdot I^2. \quad (3)$$

Отношение тепловой мощности, отбираемой от холодной стенки, к затраченной электрической мощности называется коэффициентом преобразования теплового насоса φ_C :

$$\varphi_C = \frac{-\Lambda \cdot \Delta T + \alpha \cdot T_C \cdot I - \frac{1}{2} R \cdot I^2}{\alpha \cdot \Delta T \cdot I + R \cdot I^2}. \quad (4)$$

Для «идеальной» термопары ($R = 0$ и $\Lambda = 0$) и $\varphi_C = \frac{T_C}{\Delta T}$. Этот коэффициент называется *эффективностью (КПД) цикла Карно для тепловых насосов* φ_{Carnot} . В нашем случае $\varphi_{Carnot} = 4,63$. Реальная термопара имеет коэффициент преобразования гораздо более низкий, чем φ_{Carnot} .

На рисунке 3 показана зависимость мощности P_C , отбираемой у холодного резервуара, от электрического тока, протекающего через термопару. В том случае, если $I < 0$ (не показано на рисунке 3), тепловой поток будет направлен в сторону холодного резервуара. При $I = 0$ (также не показано на рисунке 3) эффект *Пельтье* отсутствует и тепловой поток, обусловленный теплопроводностью, по-прежнему направлен в ту же сторону. При дальнейшем увеличении тока из-за эффекта *Пельтье* тепловой поток начинает уменьшаться

и в какой-то момент (в устройстве, сконструированном должным образом), тепловой поток поменяет направление, т. е. тепло будет передаваться от холодной стенки к горячей [3, 8].

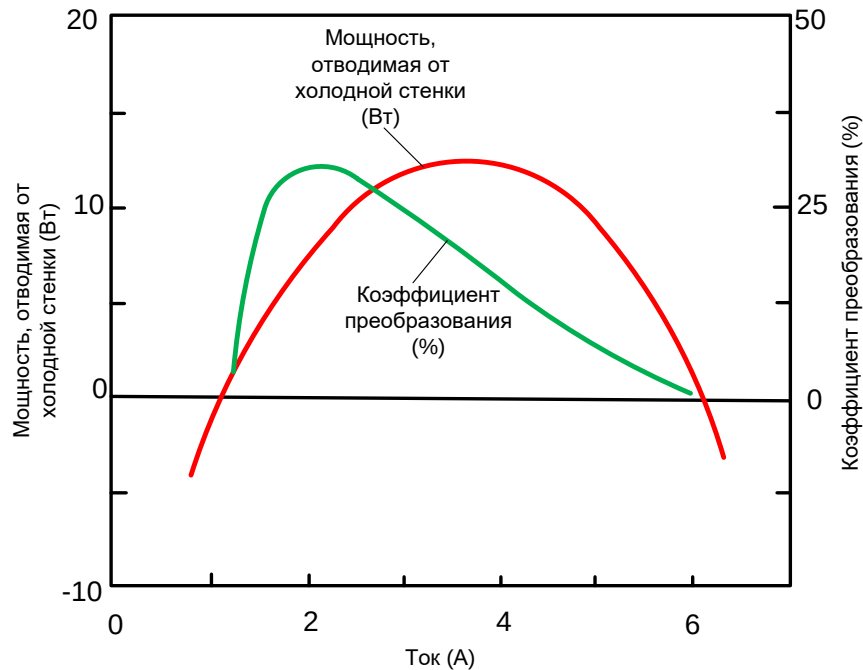


Рисунок 3. Зависимости тепловой мощности (Вт), передаваемой от холодной стенки к горячей, и коэффициента преобразования теплового насоса (%) от величины электрического тока I (А)

Вначале количество тепла, передаваемого в этом направлении, будет расти с ростом тока I , но затем увеличение количества тепла, выделяемого в результате *Джоулева* нагрева, приведёт к подавлению эффекта *Пельтье* и соответствующему уменьшению теплового потока, направленного от холодной стенки к горячей.

Легко вычислить ток, при котором тепловой поток P_C будет иметь максимальное значение:

$$\frac{\partial P_C}{\partial I} = \alpha \cdot T_C - R \cdot I = 0, \quad (5)$$

откуда

$$I_{max.cooling} = \alpha \cdot T_C / R, \quad (6)$$

при этом мощность теплового насоса:

$$P_{Cmax} = -\Lambda \Delta T + \frac{\alpha^2 T_C}{2R}. \quad (7)$$

В нашем случае ток, соответствующий максимальной мощности, равен 3,64 А, а сама максимальная мощность равна 12,83 Вт.

Минимальная температура, которую можно достичь с помощью теплового насоса, соответствует температуре, при которой $P_{Cmax} = 0$:

$$\frac{\alpha^2 T_C}{2R} = \Lambda(T_H - T_C), \quad (8)$$

откуда

$$T_{Cmin} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 2ZT_H}}{Z}, \quad (9)$$

$$Z = \alpha^2 / \Lambda R. \quad (10)$$

В нашем примере мы имеем $Z = 0,0028 \text{ K}^{-1}$ и $T_{Cmin} = 249 \text{ K}$.

Ток, при котором получается минимальная температура, равен 3,26 А, при этом перекачиваемая мощность равна нулю. Таким образом, может быть достигнута любая температура выше 249 К.

Аналогичным образом можно вычислить значение тока, при котором будет иметь место максимальное значение коэффициента преобразования теплового насоса

$$\frac{\partial \varphi_C}{\partial I} = \left(-\Lambda \cdot \Delta T + \alpha \cdot T_C \cdot I - \frac{1}{2} R \cdot I^2 \right)^{-1} \cdot (\alpha \cdot \Delta T \cdot I + R I^2)^{-2} \cdot (\alpha \cdot \Delta T + 2R \cdot I) + (\alpha \cdot \Delta T \cdot I + R \cdot I^2)^{-1} \cdot (\alpha \cdot T_C - R \cdot I) = 0, \quad (11)$$

отсюда получим:

$$I = \frac{\Lambda \cdot \Delta T}{\alpha < T >} \cdot (m + 1). \quad (12)$$

Это выражение может быть записано в виде:

$$I = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{R \cdot (m - 1)}. \quad (13)$$

Подставляя выражение для I в уравнение (4) и проводя алгебраические преобразования, можно показать, что максимальное значение коэффициента преобразования термоэлектрического холодильника равно:

$$\varphi_{Copt} = \frac{T_C}{\Delta T} \left(\frac{m - T_H/T_C}{m + 1} \right), \quad (14)$$

где $m = \sqrt{1 + Z < T >}$, а $\frac{T_C}{\Delta T}$, согласно данному выше определению, – эффективность цикла *Карно* для холодильника.

В данном случае имеем:

$$m = \sqrt{1 + Z < T >} = \sqrt{1 + 0,00288 \left(\frac{338 + 278}{2} \right)} = 1,374, \quad (15)$$

$$\varphi_{Copt} = \frac{278}{338 - 278} \left(\frac{1,374 - 338/278}{1,374 + 1} \right) = 0,308. \quad (16)$$

При этом ток будет равен:

$$I = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{R \cdot (m - 1)} = \frac{0,055 \cdot (338 - 278)}{4,2 \cdot (1,374 - 1)} = 2,10 \text{ А}. \quad (17)$$

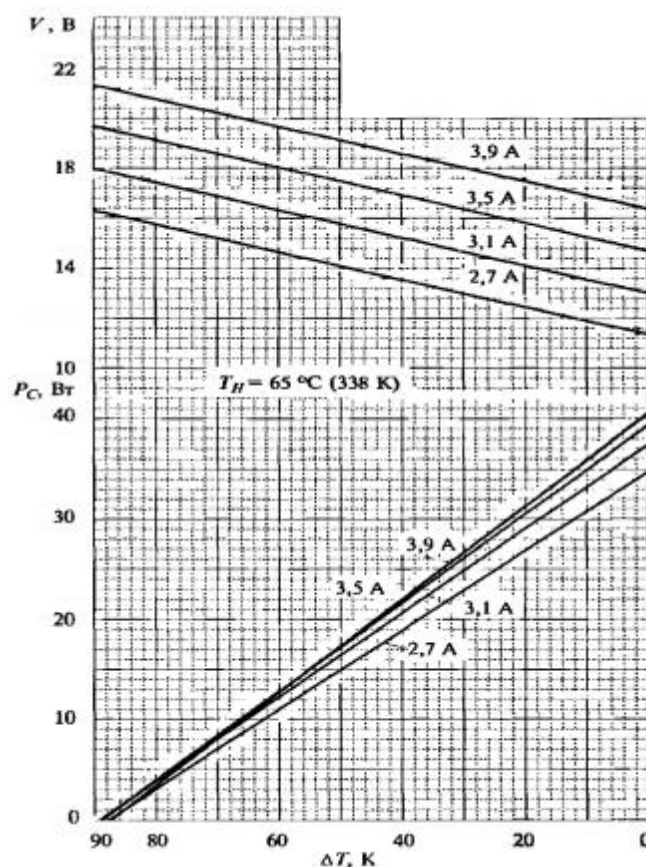


Рисунок 4. Типичные характеристики элемента *Пельтье*.

В таблице 1 проводится сравнение двух батарей, изготовленных из идентичных термопар. Каждая из батарей отводит 100 Вт тепла от стенки с температурой от 258 к 323 К [5, 9]. Одна батарея работает с минимальным числом элементов, т.е. при токе, который соответствует максимальному значению P_C .

Вторая батарея работает в режиме, при котором ток имеет значение, соответствующее максимальному значению коэффициента преобразования. Большая эффективность второй батареи достигается за счёт большего числа используемых элементов.

Таблица 1. Характеристики устройства, работающего в режиме максимального теплового потока P_C и оптимального φ_C при $P_C = 100$ Вт

Режим	Число ячеек	P_E , Вт	P_H , Вт	φ , %
Максимум P_C	100	540	640	18,5
Оптимум φ_C	161	336	436	29,7

Обычно характеристики термопар, используемых в качестве теплового насоса, представляют на графике, подобном изображённому на рисунке 4, где приведена характеристика устройства из нашего примера, которая в определённой степени соответствует характеристике модуля *Tellurex CZ1-1.0-127-1.27*, представляющего собой батарею из 127 элементов, соединённых последовательно. Большое значение α , принятое выше, относится ко всему

модулю и, следовательно, α одного элемента равно $\frac{0,055}{127} = 0,00043 \text{ В/К}$.

Заключение

После детального изучения эффекта Пельтье можно сделать вывод:

Несмотря на то, что использование эффекта Пельтье требует дополнительных мер и исследований по изучению безопасного и рационального использования модулей Пельтье в качестве охлаждающих устройств, это явление считается перспективным и полезным для человека и цивилизации. Совокупность результатов проведенных исследований дает возможность использовать их в качестве научной основы в дальнейшем при создании новых высокоэффективных ТЭГ.

Список литературы:

1. Rowe, D. Thermoelectrics handbook: macro to nano / D. Rowe. – Boca Raton: CRC Press, 2006. – Vol. 1. – Text: unmediated.
2. Influence of leg geometry configuration and contact resistance on the performance of annular thermoelectric generators / A. B. Zhang [et al.]. – Text: unmediated // Energy Conversion and Management. – 2018. – Vol. 156. – P. 337–342.
3. Sahin, A. Z. The thermoelement as thermoelectric power generator: Effect of leg geometry / A. Z. Sahin, B. S. Yilbas. – Text: unmediated // Energy Conversion and Management. – 2013. – Vol. 76. – P. 26–32.
4. Effects of the cross-sectional area ratios and contact resistance on the performance of a cascaded thermoelectric generator / Y. Luo, C. H. Kim. – Text: unmediated // International Journal of Energy Research. – 2019. – Vol. 43, Iss. 2. – P. 572–596.
5. Heikes, R. R. Thermoelectricity: Science and engineering / R. R. Heikes, R. W. Ure. – New York: Interscience Publishers, 1961. – 582 p. – Text: unmediated.
6. Зайцев, А. А. Основы физики термоэлектричества: учебно-методическое пособие / А. А. Зайцев, Д. В. Кузнецов, А. В. Сидоров. – Елец: Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина, 2018. – 41 с. – ISBN 978-5-94809-718-3. – Текст: непосредственный.
7. Бернштейн, А. С. Термоэлектрические генераторы / А. С. Бернштейн. – Москва: Госэнергоиздат, 1956. – 47 с. – Текст: непосредственный.
8. Galitskaya, A. O. Simulation of flexible thermoelectric generators with different geometry / A. O. Galitskaya, R. D. Buslaev. – Text: unmediated // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1326, Iss. 1, Art. 012033. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1326/1/012033/pdf> (дата обращения: 14.01.2026).
9. Поздняков, Б. С. Термоэлектрическая энергетика / Б. С. Поздняков, Е. А. Коптелов. – Москва: Атомиздат, 1974. – 264 с. – Текст: непосредственный.

© Злобин В. Г., 2025

**РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КЛИМАТА В ТЕПЛИЦЕ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТРОЛЛЕРА ПЛК-100**

студент **Косов Андрей Александрович**,
студент **Праслов Кирилл Дмитриевич**,
науч. руководитель: ст. преподаватель **Воюш Николай Викторович**,
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Целью данной работы является анализ системы регулирования параметров климата в теплице, а также оптимальная настройка при помощи программируемого логического контроллера ПЛК-100 в среде программного комплекса автоматизации CoDeSys. Результатом проделанной работы должен стать синтез элементов системы контроля климата в теплице, которые в общем плане будут представлять собой стенд для исследования системы контроля климата в теплице для поддержания параметров в пределах нормы обоих видов воздухообмена в ней.

Ключевые слова: контроллер, автоматизация, шаговый двигатель, стабильный климат, воздухообмен, датчики.

**DEVELOPMENT OF A LABORATORY STAND FOR STUDYING THE
CHARACTERISTICS OF AN AUTOMATED CLIMATE CONTROL
SYSTEM IN A GREENHOUSE USING A PLC-100 CONTROLLER**

Student **Kosov Andrey Aleksandrovich**,
Student **Praslov Kirill Dmitrievich**,
Academic Advisor: Senior Lecturer **Voyush Nikolay Viktorovich**,
Belarusian National Technical University,
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The purpose of this work is to analyze the climate control system in a greenhouse, as well as optimal configuration using a PLC-100 programmable logic controller in the environment of the CoDeSys automation software package. The result of the work done should be the synthesis of elements of the climate control system in the greenhouse, which in general will be a stand for the study of the climate control system in the greenhouse to maintain the parameters within the normal range of both types of air exchange in it.

Keywords: controller, automation, stepper motor, stable climate, air exchange, sensors.

Проблематикой исследования является поддержание стабильного климата, которое с учётом воздействием факторов окружающей среды является основным этапом в процессе получения урожая.

В процессе выполнения работы будут рассмотрены технические средства автоматизации в виде датчиков таких параметров, как температура в теплице, влажность почвы, вибрация стен конструкции. Отдельное внимание уделено внедрению элементов системы управления технологическим оборудованием, таким как датчики положения выходного привода для открытия и закрытия окон в теплице, а также интегральным микросхемам (таймеры, триггеры, одновибраторы, логические элементы), определяющих точное время реверса привода [1]. Программное управление технологическим оборудованием будет представлено разработкой и отладкой программы для контроллера ПЛК-100 в среде CoDeSys.

Общей актуальностью работы является общая характеристика климата в различных поясах Земли. В большинстве регионов планеты отсутствует постоянный умеренный климат, пригодный для большинства растительных культур. Резкие перепады температуры воздуха опасны для большинства растений, поэтому открытый тип земледелия относится к группе риска. Сильный ветер и крупный град также способны привести к убыткам для земледельцев.

Одним из самых востребованных типов закрытого земледелия является тепличный тип. Основным преимуществом теплиц как замкнутой системы является повышенная защищённость растений от воздействий окружающей среды. Однако при таком типе земледелия возникает необходимость точного отслеживания параметров климата в замкнутой системе.

Теоретические исследования показывают, что в первую очередь важен правильный воздухообмен с окружающей средой вокруг теплицы. Чтобы обеспечить грамотный воздухообмен, необходимо регулярно следить за температурой, влажностью, осадками, силой и направлением ветра.

Есть два вида воздухообмена: естественный и принудительный. Применительно к данной системе, для проведения естественного воздухообмена в замкнутой системе необходимо установить форточки. В данной работе они будут представлять собой две рамы из стекла, прикреплённые к двум приводам шаговых двигателей. Посредством вертикального перемещения последних будет осуществляться открытие и закрытие форточек, что позволит произвести естественный воздухообмен в теплице. Очередность открытия форточек будет осуществляться при помощи датчика направления ветра, представляющий собой электронный флюгер, имеющий два возможных сигнала на выходе – нуль или единица. Это обеспечит максимальный забор воздуха из окружающей среды согласно расположению форточек по сторонам света, а также не даст накапливаться ветренным массам под крышей теплицы. В свою очередь, потребность в естественном воздухообмене и, соответственно, запуск двигательной системы будет определяться срабатыванием датчика температуры. При появлении сильного ветра или иных признаков непогоды стены теплицы начнут вибрировать, что

будет уловлено датчиком вибраций. В этом случае любой вид проветривания будет нежелателен из-за возможности поломки каркаса теплицы, и двигатели с форточками останутся неподвижными. Механизм перемещения одной из форточек представлен на рисунке 1.



Рисунок 1. Модель механизма перемещения форточки в теплице на шаговом двигателе ДШИ-200-1

Принудительный воздухообмен осуществляется при помощи вентилятора, захватывающего потоки внешнего воздуха вокруг системы и передающих его в теплицу. Запуск вентилятора осуществляется с поступлением сигнала высокого уровня (логической единицы) с датчика влажности, что свидетельствует о необходимости вывода её избытков из теплицы. Отсутствие вентилятора и неисправность датчика влажности и, как следствие, отсутствие принудительного воздухообмена могут создать злокачественную среду, в которой могут появиться паразиты и плесень. У растений могут развиваться болезни, что приведёт к порче будущего урожая. Как и в случае с проветриванием форточками, необходимо следить, чтобы во время ураганных ветров система проветривания вентилятором была отключена. Также следует отметить отсутствие необходимости в работе вентилятора при открытых форточках во избежание сквозняка, пагубного для большинства молодых растений. Для определения момента такого отключения используется датчик вибраций. Конструктивно вентилятор представляет собой набор лопастей, прикреплённых к валу двигателя постоянного тока. Модель сборки вентилятора представлена на рисунке 2.

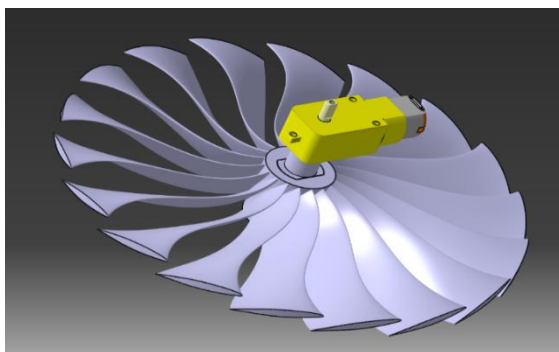


Рисунок 2. Модель сборки вентилятора для принудительного воздухообмена в теплице

Также отдельное внимание уделено созданию системы оповещения о неполадках в электрических цепях системы, имеющей собирательное название «Alarm» [2]. При сильном ветре, обрыве контактов датчиков и приводов, а также низкой температуре в течение длительного времени включится звуковое предупреждение. Если человек, выходя из теплицы, забудет закрыть за собой дверь в неё, также будет подан звуковой сигнал.

При создании воздухообмена в теплице необходимо построить план расположения форточек и вентиляторов. При обоих видах воздухообмена происходит циркуляция внешнего и внутреннего потоков воздуха из теплицы и обратно в неё. Согласно законам физики, горячий воздух в теплице поднимается и скапливается непосредственно под её крышей, и выводить его удобнее именно оттуда. Вентилятор может создавать непригодный для растений сквозняк, поэтому его необходимо располагать под крышей теплицы для выведения потоков тёплого воздуха во внешнюю среду. На высоте роста растений устанавливаются форточки с прикреплёнными к ним приводами для получения прохладной воздушной массы вблизи поверхности земли. Пространственное размещение элементов системы воздухообмена в теплице показано на рисунке 3.

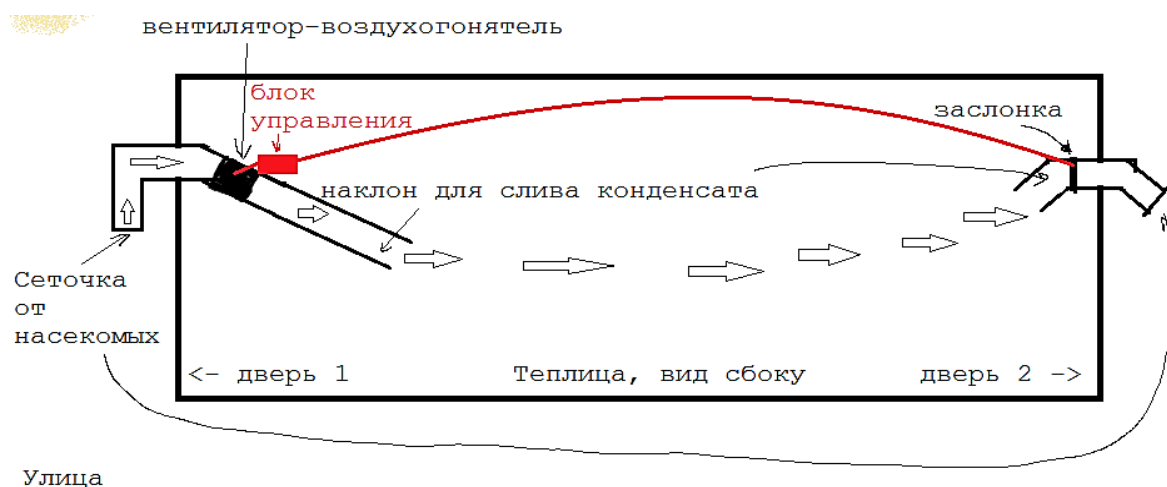


Рисунок 3. Пространственное размещение элементов системы воздухообмена в теплице

Практическая часть работы связана с реализацией системы управления приводами обеих фрамуг, вентилятором, а также всеми датчиками обратной связи для них на базе программируемого логического контроллера ПЛК100, в том числе непосредственной управляющей программы в среде CoDeSys. Также отдельной частью этого раздела является сборка механического каркаса теплицы, укладка соединительных проводов, изготовление технических выводов в стенках каркаса для воздухообмена, монтаж всех необходимых источников питания. Основная цель: моделирование системы автоматического воздухообмена с отслеживанием датчиков освещённости, температуры, влажности и вибраций, а также последующий подбор элементной базы для её реализации [3].

Сборка автоматического проветривания содержит следующие структурные компоненты:

- каркас теплицы из оргстекла;
- каркас форточек (фрамуги);
- 2 шаговых двигателя 24V ДШИ-200-1 и драйвера к ним;
- блок микросхем для реверса шаговых двигателей (2 корпуса K155ЛА3 (И-НЕ), 2 корпуса K155АГ1(одновибраторы), 1 корпус K155ТМ2 (D-триггер), 1 корпус K155ЛН3 (инверторы));
- 4 магнитных датчика для определения положения на основе герконов;
- модуль цифрового датчика температуры;
- модуль цифрового датчика влажности;
- модуль цифрового датчика вибраций;
- модуль генератора прямоугольных импульсов на основе таймера NE555 для задания скорости вращения шагового двигателя с регулируемой частотой и скважностью сигнала;
- электронный флюгер для определения направления ветра;
- 5 макетных плат (Breadboard).

Система автоматического проветривания состоит из двух частей: механической и электронной. Механическая часть представлена деревянными форточками с металлическим каркасом, который прикреплён винтами и саморезами к деревянным подложкам, расположенных на выходных валах шаговых двигателей. Форточки выполняет роль подвижного механизма в системе проветривания теплицы. Их вертикальное перемещение осуществляется вращением вала шагового двигателя и одновременным запуском соединённой с ним червячной передачи с её многочисленными витками, входящими в зацеп с деревянной подложкой. В дополнение к приводам форточек в механическую часть системы также внедрён вентилятор на двигателе постоянного тока.

Электронная часть лабораторного стенда представляет собой систему автоматического регулирования с наличием обратной связи в контуре скорости электропривода, а также контроль чувствительности датчиков освещённости, температуры и влажности в теплице [4]. Структурная схема обмена данными между блоком управления и периферийными устройствами изображена на рисунке 4.

В электронной части данной работы присутствуют две ветви управления элементами всей системы: управление скоростью вращения шаговых двигателей и управление чувствительностью датчиков.

Первый вид управления использует драйвер шагового двигателя. Обратная связь по скорости работает следующим образом. Посредством поступления данных о скорости на вход микропроцессора на плате драйвера принимается дальнейшее решение о переключении двигателя на другой скоростной режим, после чего вступает в действие программный анализ скорости двигателя и последующая её регулировка (увеличение, уменьшение, поддержание) посредством задания скважности ШИМ для управления

скоростью вращения электродвигателя. Разработка обратной связи по скорости обусловлена инерционностью системы при открытии и закрытии форточек. Слишком быстрое открытие может привести к поломке системы. Медленное закрытие под нагрузкой собственного веса приводило бы к перегреву двигателя из-за повышенного потребления тока.

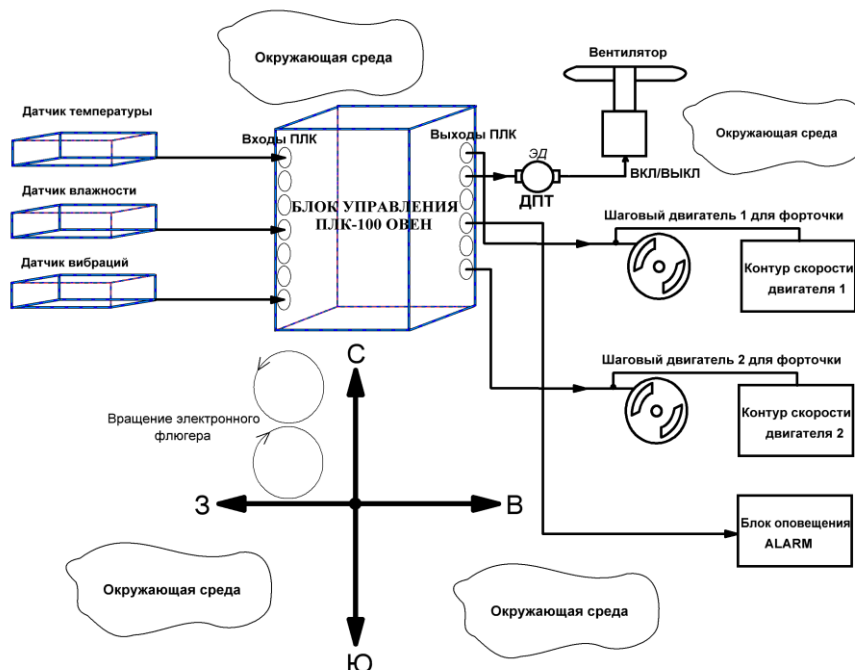


Рисунок 4. Структура передачи данных от микроконтроллера к периферийным устройствам

Управление чувствительностью датчиков осуществляется через программирование контроллера ПЛК100, тем самым задавая такой важный параметр, как порог срабатывания датчиков. Пороги срабатывания датчиков выставляются программным способом в среде разработки ПО для контроллеров CoDeSys в зависимости от потребностей выращиваемых растений, тем самым осуществляя управление их чувствительностью. Благодаря такому управлению датчиками удаётся достигнуть автоматического проветривания в зависимости от дневного либо ночного режима работы. При наличии сведения о температуре и влажности в теплице есть возможность проводить процесс воздухообмена в любое время суток.

Программная часть данной работы реализуется в написании кода для прошивки ПЛК-100. Код оптимизирован под минимальный объём использования памяти компьютера/ноутбука. На примере подсистемы контроля уровня влажности с помощью вентилятора рассматривается процесс работы с входными и выходными переменными в среде CoDeSys.

Подсистема работает следующим образом. Необходимость во включении вентилятора определяется наличием соответствующих состояний входных переменных. Входами подсистемы являются логические переменные, показывающие состояния цифровых датчиков температуры, влажности и вибраций (переменные *zhara*, *humidity*, *udar*). Вентилятор запускается

посредством изменения состояния выходной логической переменной ventil в соответствии с таблицей истинности входных переменных [5]. Таблица истинности всей подсистемы строится в CoDeSys при помощи нужного набора микросхем элементарной логики. Окончательный вид электрической схемы подсистемы контроля уровня влажности представлен на рисунке 5.

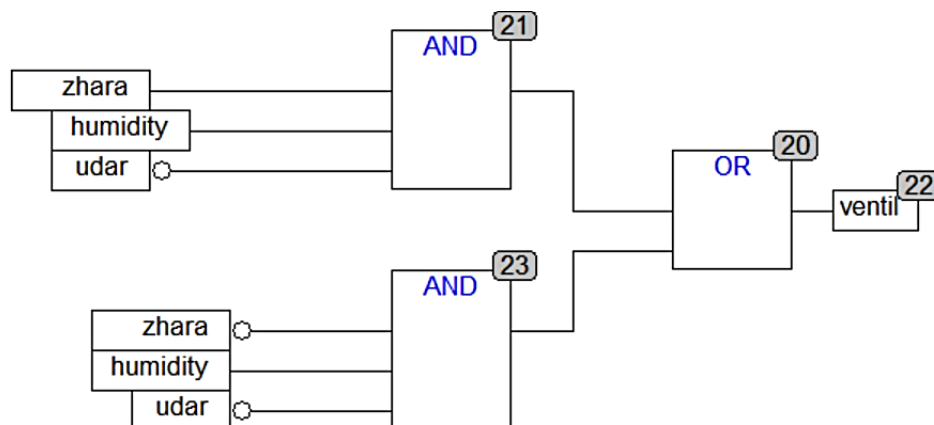


Рисунок 5. Электрическая схема подсистемы контроля уровня влажности в среде CoDeSys

В результате данной работы можно сделать вывод о том, что в связи с увеличением цены на отдельные программные компоненты и объекты симулирования выгоднее разрабатывать реальные физические модели, так как это обусловлено относительной дешевизной структурных компонентов, необходимых для функционирования данных моделей.

Список литературы:

1. Экология и безопасность жизнедеятельности: учебное пособие для вузов / Л. А. Кривошеин, Н. Н. Муравей; под редакцией Л. А. Муравья. – Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2000. – 447 с. – Текст: непосредственный.
2. Гаркушенко, В. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / В. И. Гаркушенко, Г. Л. Дегтярев. – Казань: Издательство Казанского государственного технического университета, 2010. – 274 с. – Текст: непосредственный.
3. Волкова, Е. С. Автоматизация технологических процессов сельскохозяйственного производства: учебное пособие / Е. С. Волкова, Е. С. Якубовская. – Минск: БГАТУ, 2008. – 157 с. – Текст: непосредственный.
4. Фалк, Г. Б. Электрические микромашини: учебное пособие / Г. Б. Фалк, Е. В. Арменский. – Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, 1986. – 203 с. – Текст: непосредственный.
5. Комиссарчик, В. Ф. Автоматическое регулирование технологических процессов: учебное пособие / В. Ф. Комиссарчик; Тверской государственный технический университет. – 2-е изд., расшир. – Тверь: ТГТУ, 2001. – 248 с. – Текст: непосредственный.

ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ ЗНАЧЕНИЙ СКОРОСТЕЙ РАСТВОРОВ РАЗНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ С МЕХАНИЧЕСКИМИ ПРИМЕСЯМИ

д-р техн. наук, профессор **Суслов Вячеслав Александрович**,
Санкт-Петербургский государственный технический университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрен относительно простой и надёжный способ контроля малых скоростей растворов разных концентраций, содержащих значительное количество механических примесей, при поступлении их в кипяtilьные трубы.

Ключевые слова: расход рабочей жидкости, механические примеси, концентрация, температура, плотность, расходомеры, сопротивления, испаритель.

MEASUREMENT LOW VELOCITY VALUES OF SOLUTIONS OF DIFFERENT CONCENTRATIONS WITH MECHANICAL IMPURITIES

Doctor of Technical Sciences, Professor
Suslov Vyacheslav Aleksandrovich,
Saint Petersburg State Technical University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Power Engineering,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. A relatively simple and reliable method for monitoring low velocities of solutions of different concentrations containing a significant number of mechanical impurities when they enter the boiling pipes is considered.

Keywords: working fluid flow rate, mechanical impurities, concentration, temperature, density, flow meters, resistance, evaporator

Поддержание необходимого расхода рабочей жидкости является одним из основных требований для работы промышленных и в особенности исследовательских установок. В настоящее время на практике применяется большое количество традиционных методов определения скоростей исследуемых потоков [1, 2, 3, 4, 5]. Однако задача определения и контроля малых значений скоростей растворов с механическими примесями, таких как отработанные растворы целлюлозного производства в диапазоне скоростей от 0,001 до 0,5 м/с, резко усложняется из-за их специфических свойств [6]:

а) содержание значительного количества механических, загрязняющих и

пенообразующих примесей;

б) большого диапазона изменения концентрации: 0 – 70 % абсолютно сухого вещества (а. с. в.);

в) высокой агрессивности раствора;

г) сравнительно высокой температуры жидкости при выпаривании, колеблющейся в пределах 50 – 140 °С;

д) изменения плотности растворов при их выпаривании в пределах $(1 - 1,4) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;

Наиболее часто при исследованиях применяются расходомеры переменного перепада давления, которыми называются измерительные приборы [2], основанные на измерении перепада давления, создаваемого движущейся жидкостью за счёт сужающих устройств, трубного сопротивления или напорных усилителей.

К приемным преобразователям относят устройства, преобразовывающие измеряемые прибором величины в отличные от них величины. Преобразователи классифицируют как:

а) приемные преобразователи расхода, подразделяющиеся на:

- суживающие устройства;

- трубные сопротивления, использующие существующий элемент трубы, что исключает установку специального приемника; однако при использовании этих приборов не достигается требуемая точность измерения расхода и возникает необходимость индивидуальной градуировки;

- сопротивления вязкостного трения применяются при измерении весьма малых расходов;

б) приемные преобразователи местной скорости, подразделяющиеся на:

- напорные устройства;

- напорные трубки, дающие перепад давления, зависящий от скорости потока в данной точке.

- напорные усилители, подобно напорным трубкам, показывающие перепад давления, зависящий от скорости потока в данной точке; для измерений расхода они применяются редко, главным образом в трубопроводах с очень малыми скоростями.

Неудовлетворительная работа сужающих устройств может возникать из-за следующих причин.

1) Неправильное изготовление сужающих устройств или несоответствием их размерам трубопровода, характеризуемым:

- недостаточной остротой входной кромки диафрагмы, приводящей к увеличению коэффициента расхода $\alpha = \beta \cdot k_\beta \cdot \mu \cdot k_\phi \cdot k_\xi \cdot k_k$, важнейшего сомножителя уравнения расхода; при $\mu = 1$ и $k_\beta = 1 \rightarrow \alpha = \beta \cdot k_\phi \cdot k_\xi \cdot k_k$,

где β – коэффициент скорости входа; μ – коэффициент сужения;

k_ϕ – коэффициент отбора; k_ξ – коэффициент потерь; K_k – коэффициент распределения скоростей;

- увеличением толщины цилиндрической части отверстия диафрагмы

сверх $0,2D$, приводящим к увеличению коэффициента расхода;

- неточностью в изготовлении и измерении диаметра отверстия сужающего устройства, приводящего к погрешности любого знака;

- наличием конусности в цилиндрической части сопла, уменьшающего коэффициент расхода;

- несоответствием размеров сопла внутреннему диаметру трубопровода.

2) Близость местных сопротивлений, из-за чего для снижения погрешности устанавливают сужающее устройство на достаточном расстоянии от источников возмущения, т. е. необходимо иметь между ними прямолинейный участок определенной длины. Согласно рекомендациям ISO в таблице 1 [2] приведены необходимые длины прямых участков труб перед диафрагмами и соплами для основных типов местных сопротивлений;

Таблица 1. Наименьшая длина прямых участков труб перед сужающим устройством (диафрагма или сопло) и после него

d/D	Прямой участок l_1/D перед сужающим устройством						Прямой участок l_2/D после сужающего устройства при любом местном сопротивлении
	Одно прямое (90°) колено или тройник	Два и более прямых колен в одной плоскости	Два и более прямых колен в разных плоскостях	Расширение или сужение	Сферический, полностью открытый вентиль	Полностью открытая задвижка	
0,2	10 (6)	14 (7)	34 (17)	16 (8)	18 (9)	12 (6)	4 (2)
0,25	10 (6)	14 (7)	34 (17)	16 (8)	18 (9)	12 (6)	4 (2)
0,3	10 (6)	16 (8)	34 (17)	16 (8)	18 (9)	12 (6)	5 (2,5)
0,35	12 (6)	16 (8)	36 (18)	16 (8)	18 (9)	12 (6)	5 (2,5)
0,4	14 (7)	18 (9)	36 (18)	16 (8)	20 (10)	12 (6)	6 (3)
0,45	14 (7)	18 (9)	38 (19)	18 (9)	20 (10)	12 (6)	6 (3)
0,50	14 (7)	20 (10)	40 (20)	20 (10)	22 (11)	12 (6)	6 (3)
0,55	16 (8)	22 (11)	44 (22)	20 (10)	24 (12)	14 (7)	6 (3)
0,60	18 (9)	26 (13)	48 (24)	22 (11)	26 (13)	14 (7)	7 (3,5)
0,65	22 (11)	32 (16)	54 (27)	24 (12)	28 (14)	16 (8)	7 (3,5)
0,70	28 (14)	36 (18)	62 (31)	26 (13)	32 (16)	20 (10)	7 (3,5)
0,75	36 (18)	42 (21)	70 (35)	28 (14)	36 (18)	24 (12)	8,4
0,8	46 (23)	50 (25)	80 (40)	30 (15)	44 (22)	30 (15)	8,4

3) Неправильный монтаж сужающих устройств при:

- эксцентричной установке сужающего устройства – допустимый эксцентриситет (кратчайшее расстояние между осью сопла и осью трубы) не более $0,015D \cdot (D/d - 1)$;

- прокладке, заходящей внутрь трубопровода;

- нестандартным отборе перепада давлений.

4) Дефекты трубопровода:

- нецилиндричность поперечного сечения трубопровода;

- шероховатость внутренней поверхности;

- наличие клепаных фланцев и сварных швов, выступающих внутрь трубы.

5) дефекты, возникающие в процессе эксплуатации.

Наиболее известными сужающими устройствами для малых чисел Re являются двойные диафрагмы, диафрагмы с двойным скосом и сопла – «четверть круга», «полкруга», цилиндрические и комбинированные.

Четыре разновидности сопла с профилем в четверть окружности, обычно называемые соплом «четверть круга» показаны на рисунке 1 [2].

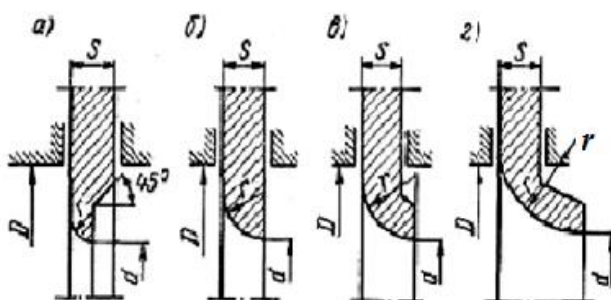


Рисунок 1. Сопло «Четверть круга»

а) $r > s$; б) $r = s$; в) $r < s$; г) $r = 0,5(D - d)$

Следует отметить, что эти сопла обеспечивают постоянство коэффициента расхода в широкой области чисел Re только при определенных радиусах профиля, зависящих от диаметра отверстия сопла. В таблице 2 [2] приведены основные данные по этим соплам.

Таблица 2. Основные характеристики сопла «Четверть круга»

Тип сопла	m	r/d	r/D	α	Область применения	
					Re_{min}	Re_{max}
а), б), в)	0,0506	0,100	0,0224	0,771	700	56000
	0,160	0,112	0,045	0,792	650	140000
	0,250	0,135	0,0675	0,830	330	240000
	0,360	0,208	0,125	0,903	300	270000
	0,391	0,285	0,178	0,993	370	150000
г)	0,440	0,377	0,250	0,974	250	200000
	0,490	0,446	0,312	1,012	200	200000

С помощью рисунка 2 можно выбрать значения r/d для любых m для таблицы 2 в пределах 0,05-0,49

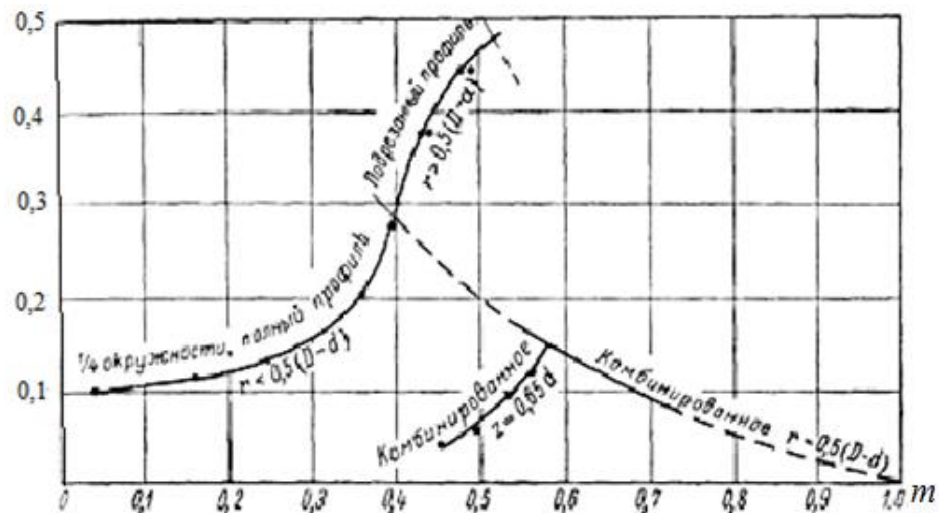


Рисунок 2. Зависимость радиуса входного профиля сопла «четверть круга» и комбинированного сопла от m

Значения Re_{min} пока не могут считаться строго установленными. Поэтому для надежности стремятся к большим из приведенных в таблице 2 значениям цифр, а $Re_{max} < 100000$. При этом необходима высокая точность изготовления профиля сопел «четверть круга»: однотипная шероховатость и отклонение профиля сопла не должны превышать 0,01 мм [2].

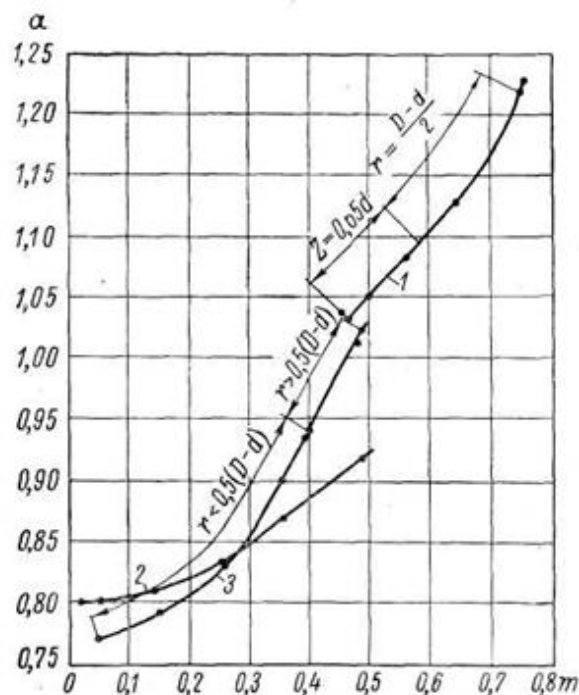


Рисунок 3. Коэффициенты расхода α в зависимости от m для сопел:
1 – комбинированное; 2 – цилиндрическое; 3 – четверть круга

В дополнение к соплам «четверть круга» были разработаны так называемые комбинированные и цилиндрические сопла. Первые охватывают область больших m – от 0,45 до 0,75, где сопла «четверть круга» не дают хороших результатов, вторые, наоборот, – область малых и средних m – от 0,01 до 0,4. Комбинированные сопла имеют входную часть, аналогичную соплам «четверть круга», но только очерченную значительно меньшим радиусом r , который берется по нижней кривой (рис. 3).

Сотрудниками кафедры промышленной теплоэнергетики Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД в соответствии с требованиями теплового подобия был спроектирован, изготовлен и смонтирован на заводе «Красный химик» стенд [6], предназначенный для исследования теплообмена при выпаривании отработанных растворов сульфат-целлюлозного производства. Опытный испаритель (рис. 4) представлял собой однострунный вертикальный однопроходной ВА, работающий в замкнутом циркуляционном контуре, где в зависимости от необходимости могла быть осуществлена как естественная, так и вынужденная циркуляция раствора. Для привода насоса использовались электродвигатели, собранные по схеме «асинхронный двигатель АД» – «генератор постоянного тока Г» – «двигатель постоянного тока». Поверхностью теплообмена служила стальная нержавеющая труба (1), выполненная из стали X18H10T диаметром 57×3,5 мм, активная длина которой составляла 7,9 м. Датчики для измерения температур выпариваемого раствора и стенки кипяtilьной трубы, статического давления и отвода конденсата греющего пара были вмонтированы в кипяtilьной трубе. Все указанные датчики монтировались в двадцати равномерно распределённых по высоте кипяtilьной трубы измерительных участках. Для определения плотности теплового потока по длине кипяtilьной трубы к ней с шагом 415 мм были приварены конденсатосборные стаканы (2) для сбора и отвода конденсата с отдельных участков по высоте трубы. Каждый стакан соединялся с соответствующим мерником конденсата (3) ёмкостью 1,2 литра трубопроводом. Для предотвращения вскипания конденсата трубопроводы проложены внутри греющей камеры с выходом в горизонтальную паровую рубашку, под которой были установлены мерники. Последние были выполнены из труб диаметром 57 × 3,5 мм и заключены в паровые рубашки диаметром 159 мм. Каждый мерник был оборудован водомерным стеклом для определения количества собирающегося в нем конденсата. В верхнем конце кипяtilьной трубы прикреплен конус (4) для отвода конденсата, образующегося на торцевой крышке греющей камеры. Нижний участок кипяtilьной трубы отделен от греющей камеры стаканом (5). Таким образом, в мерники конденсата мог попадать конденсат, образующийся только на поверхности кипяtilьной трубы. Конденсат, образующийся на стенках греющей камеры и мерников, вследствие потерь тепла в окружающую среду, отводился в дренаж.

Греющий пар после дроссельного вентиля (6), электрического нагревателя

(7), где нагревался на $10 \div 15$ °С, и водоотделителя (8) подводился к установке в четырех точках по высоте греющей камеры.

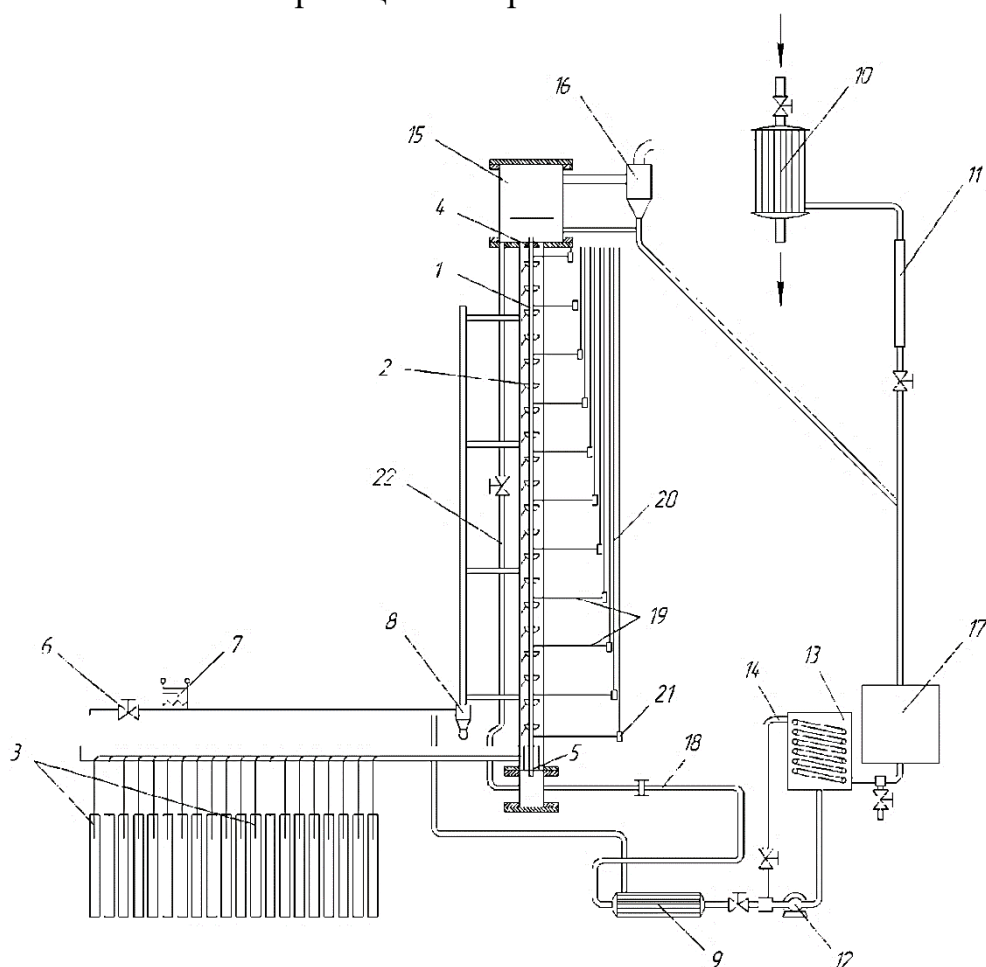


Рисунок 4. Схема экспериментального стенда:

1 – кипяtilьная труба; 2 – конденсатосборные стаканы; 3 – мерники конденсата; 4 – конус для отвода конденсата с верхней трубной доски; 5 – стакан отвода конденсата с нижней трубной доски; 6 – дроссельный вентиль; 7 – электрический нагреватель; 8 – водоотделитель; 9 – паровой подогреватель раствора; 10 – конденсатор вторичного пара; 11 – мерник конденсата; 12 – шестеренчатый насос; 13 – питательный бак; 14 – возвратная магистраль; 15 – сепаратор; 16 – тангенциальная щелочная ловушка; 17 – сборный бак; 18 – участок стабилизации для измерения скорости потока раствора; 19 и 20 – импульсные и пьезометрические трубки; 21 – буферные сосуды; 22 – водомерное стекло

Вторичный пар, полученный от выпаривания растворов, конденсировался в конденсаторе (10) и поступал в мерник (11). Для обеспечения циркуляции раствор из питательного бака (13) шестеренчатым насосом (12) подавался в паровой подогреватель (9), где устанавливалась необходимая для исследований температура раствора при входе в кипяtilьную трубу. Часть раствора по возвратной магистрали (14) возвращалась в питательный бак. Необходимый расход раствора в кипяtilьную трубу устанавливался с помощью изменения

числа оборотов насоса и соотношения открытия вентилей на питательной и возвратной магистралях. Раствор из подогревателя поступал на участок стабилизации (18) с установленным на нем дроссельным расходомером.

Далее из участка стабилизации он поступал в приемную камеру опытного ВА, а затем в его кипяtilьную трубу. Выпаренный раствор, отделенный от выпара сепаратором (15) и щелочовой ловушкой (16), направлялся в сборный бак (17). Для создания замкнутой схемы на стенде предусмотрена возможность отвода конденсата вторичного пара из мерника в сборный бак. После окончания экспериментов установка регулярно промывалась водой.

Исходя из изложенного для измерения скорости раствора при входе в кипяtilьную трубу был применен дроссельный расходомер. Датчиком этого прибора служило специально рассчитанное сопло «четверть круга», профиль которого образует в радиальном сечении четвертую часть окружности [3]. Сопло было установлено на участке стабилизации, представляющий собой необогреваемый участок трубы диаметром равным диаметру кипяtilьной трубы и длиной 200 мм.

При измерении малых скоростей $w_0 < 0,1$ м/с для увеличения разности высот столбов жидкости в дифференциальном манометре в четыреххлористом углероде растворяли турбинное масло, что позволяло увеличить разность столбов жидкости при $w_0 = idem$ примерно в пять раз. В ряде случаев пользовались опрокинутыми дифференциальными манометрами, залитыми керосином. Однако, увеличение измеряемого перепада на дифференциальном манометре не устраняло основного недостатка этого способа – необходимости фиксации очень малых импульсов, определяемых разностью давлений на концах измерительной трубки. При скорости циркуляции $w_0 < 0,1$ м/с разность давлений соответствовала $\Delta P < 10$ Н/м². Расходомер тарировался отдельно для различных концентраций щелока. Однако невозможность точного измерения расходомером переменного перепада давления, очень малых импульсов, определяемых разностью давления в измерительном сопле, и высокая инерционность системы, состоящей из тонких соединительных трубок, заполненных измерительной жидкостью, не позволяла получить надежных данных. Определению w_0 по количеству выходящей из кипяtilьной трубы жидкости и по измерению на входе и выходе из неё концентрации раствора в опытах с черным щелоком также не давало надежных результатов, поскольку эти методы были недостаточно точны. Поэтому для каждой серии опытов с постоянными скоростью и концентрацией раствора проводились дублирующие измерения скорости.

Основным дублирующим способом измерения расхода щелока был принят объемный способ, заключающийся в измерении объемов раствора на входе в кипяtilьную трубу и на выходе из нее, а также объема конденсата вторичного пара в определенные промежутки времени.

Выводы

1. Дана классификация расходомеров переменного перепада давления, создаваемого движущейся жидкостью в области малых чисел Рейнольдса.
2. Показаны основные причины погрешности этих устройств.
3. Для измерения и поддержания скорости раствора при входе в кипятельную трубу экспериментального стенда на специальном измерительном участке был применен дроссельный расходомер, датчиком которого служило специально рассчитанное сопло «четверть круга», позволявшее контролировать скорости в пределах 0,01 – 0,1 м/с.

Список литературы:

1. Измерение локальных характеристик и структуры двухфазного потока в стационарных и динамических режимах на крупномасштабных стендах / Э. А. Болтенко, В. Р. Цой // Труды третьей российской национальной конференции по теплообмену. – М., 2002. – Т. 1. – С. 37–42.
2. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества / П. П. Кремлевский. – Ленинград: Машиностроение, 1975. – 776 с.
3. Френкель, Б. А. Измерение малых и микрорасходов продуктов нефтехимических производств: (тематические обзоры) / Б. А. Френкель. – Москва: ЦНИИТЭНефтехим, 1973. – 120 с.
4. Чистяков, С. Ф. Теплотехнические измерения и приборы: [учебное пособие для вузов] / С. Ф. Чистяков, Д. В. Радун. – Москва: Энергия, 1972. – 392 с.
5. Бошняк, Л. Л. Измерение малых расходов жидкостей / Л. Л. Бошняк, Л. Н. Бызов. – Москва: Машгиз, 1961. – 80 с.
6. Суслов, В. А. Тепловые процессы в выпарных установках ЦБП: монография / В. А. Суслов, А. А. Поздняков. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 2022. – 400 с.

© Суслов В. А., 2025

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ТОРФА В КАЧЕСТВЕ МЕСТНОГО ТОПЛИВА НА ТЭЦ В УСЛОВИЯХ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ

студент **Хафизова Марсиля Марсовна**,
науч. руководитель: канд. экон. наук, доцент **Филина Ольга Владимировна**,
Казанский государственный экономический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В статье исследуется экономическая целесообразность использования торфа как топлива для ТЭЦ в России в контексте декарбонизации. Анализируются конкурентные преимущества торфа как локального ресурса и экологические дилеммы его добычи. Делается вывод, что его рентабельность возможна в удаленных регионах при условии внедрения стандартов устойчивого управления и комплексной госполитики, минимизирующей углеродный след.

Ключевые слова: торф, декарбонизация, энергобаланс, конкурентоспособность, локальное топливо, углеродный след, экономическая целесообразность.

ECONOMIC ASSESSMENT OF THE COMPETITIVENESS OF PEAT AS A LOCAL FUEL FOR CHP PLANTS IN THE CONDITIONS OF ENERGY DECARBONIZATION

Student **Khafizova Marsilya Marsovnna**,
Academic Advisor: PhD in Economic, Associate Professor **Filina Olga Vladimirovna**,
Kazan State University of Economics,
Kazan, Russian Federation

Abstract. This article examines the economic feasibility of using peat as a fuel for combined heat and power plants (CHPs) in Russia in the context of decarbonization. It analyzes the competitive advantages of peat as a local resource and the environmental challenges of its extraction. It concludes that its profitability is possible in remote regions provided sustainable management standards and comprehensive government policies that minimize the carbon footprint are implemented.

Keywords: peat, decarbonization, energy balance, competitiveness, local fuel, carbon footprint, economic feasibility.

Глобальный тренд на декарбонизацию экономики, инициированный Парижским соглашением, кардинально меняет ландшафт энергетической отрасли. Для России, взявшей на себя обязательства по достижению углеродной нейтральности к 2060 году, актуализируется задача диверсификации

топливного баланса и внедрения решений, снижающих зависимость от ископаемого топлива. В этом контексте возрастает интерес к локализованным энергоресурсам, среди которых значительный, но недооцененный потенциал имеют торфяные месторождения. Несмотря на то, что Россия обладает вторыми в мире запасами торфа, его доля в энергобалансе остается минимальной. Целью данной работы является многофакторная оценка экономической целесообразности и конкурентных позиций торфа как топлива для ТЭЦ с учетом стратегических задач декарбонизации. Актуальность темы обусловлена необходимостью поиска сбалансированных решений, которые позволяли бы одновременно обеспечивать энергетическую безопасность регионов, стимулировать их экономическое развитие и соответствовать общемировым экологическим трендам.

Декарбонизацию следует понимать как системный процесс, направленный на сокращение эмиссии парниковых газов на всех стадиях производства и потребления энергии. Этот процесс реализуется не только через внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ), но и через повышение эффективности использования существующих ресурсов и переход на виды топлива с улучшенными экологическими характеристиками. Как отмечают эксперты, ключевым принципом становится «иерархия декарбонизации»: в первую очередь – снижение потребления, затем – повышение эффективности, и только потом – замена топлива. В рамках этой иерархии торф занимает сложную, неоднозначную позицию. С теоретической точки зрения, он не является возобновляемым ресурсом в том же смысле, что солнечная энергия или ветер, поскольку скорость его образования на порядки ниже скорости потребления. Однако, с другой стороны, он представляет собой альтернативу ископаемому углю и может рассматриваться как вид биотоплива, пусть и с определенными оговорками. В рамках переходного периода к низкоуглеродной экономике, который может занять несколько десятилетий, такие ресурсы, как торф, играют критически важную роль «мостикового топлива». Они позволяют снизить углеродный след энергогенерации здесь и сейчас, без необходимости немедленной и капиталоемкой замены всей энергетической инфраструктуры, что особенно актуально для изолированных регионов с устаревшим парком генерирующего оборудования [1].

Торфяная отрасль России переживает продолжительный кризис, о чем свидетельствует многократное сокращение объемов добычи за последние два десятилетия. Анализ, проведенный Березкиной А. Ю. и Яконовской Т. Б., выявил, что до 90 % торфодобывающих предприятий в отдельных регионах прекратили свою деятельность, что связывается с правовой неопределенностью статуса торфа, фискальной нагрузкой и отсутствием последовательной государственной политики в этой сфере [2]. Это создает серьезные риски для экономической безопасности сохранившихся предприятий и сдерживает инвестиции в модернизацию. Глубокий системный кризис отрасли коренится в наследии плановой экономики, когда торф добывался в огромных объемах без должного учета экологических последствий и экономической эффективности. После перехода к рыночным отношениям отрасль оказалась

неконкурентоспособной по сравнению с дешевым природным газом. В настоящее время основные проблемы носят структурный характер: это высокая капиталоемкость восстановления производств, зависимость от климатических условий, влияющих на цикл добычи, и сезонность поставок. Кроме того, существует проблема кадрового голода, поскольку за годы упадка была утрачена профессиональная база. Все эти факторы формируют негативный инвестиционный климат и должны быть учтены при любой попытке реанимирования интереса к торфу как к энергоресурсу.

Торф как твердое топливо занимает промежуточное положение между бурым углем и биомассой. Его ключевыми преимуществами являются низкое содержание серы, что обуславливает минимальные выбросы диоксида серы (SO_2), и высокий выход летучих веществ, обеспечивающий стабильность процесса горения. Недостатком остается повышенная влажность, требующая затрат энергии на предварительную подсушку или использования технологий сжигания, адаптированных к влажному топливу. С теоретической точки зрения, энергетическая ценность торфа напрямую зависит от степени его углефикации и зольности. Технологии подготовки торфа к сжиганию, такие как брикетирование и гранулирование, позволяют существенно повысить его энергетическую плотность, снизить транспортные издержки и улучшить сыпучесть, что облегчает автоматизацию процессов загрузки в топки котлов. При сравнении с углем важно учитывать не только удельную теплоту сгорания, но и комплекс эксплуатационных характеристик. Зола торфа, в отличие от угольной, обладает меньшей температурой плавления, что требует корректировки режимов работы котла для предотвращения шлакования поверхностей нагрева. В то же время, она может находить применение в сельском хозяйстве в качестве мелиоранта, создавая дополнительный источник дохода и замыкая технологический цикл. Таким образом, конкурентные преимущества торфа проявляются не в абсолютных цифрах его теплотворной способности, а в комплексе факторов, включая экологические параметры, локализацию и возможность создания безотходных производственных цепочек.

Экологическая оценка торфа носит двойственный характер, что составляет основную теоретическую и практическую проблему для его интеграции в стратегию декарбонизации [3]. С одной стороны, при замене им угля на ТЭЦ достигается значительное снижение выбросов сернистых соединений и твердых частиц. С другой стороны, возникает парадокс: осушение торфяников для добычи топлива запускает процессы аэробного окисления и разложения органического вещества, что приводит к интенсивным выбросам CO_2 , накопленного за столетия. Таким образом, чистая климатическая выгода от использования торфа возможна только при условии применения методов устойчивого управления месторождениями, включая рекультивацию и нормирование объемов добычи в соответствии со скоростью восстановления экосистем. Теоретически, углеродный баланс торфяного месторождения можно рассматривать в динамике. Невозобновляемая добыча ведет к безвозвратной эмиссии углерода. Однако существуют концепции парниково-водородного баланса, согласно которым выбросы от сжигания торфа

частично компенсируются прекращением эмиссии от осушенного, но не эксплуатируемого месторождения, которое постоянно тлеет и выделяет CO₂. Более того, при грамотной рекультивации и обводнении отработанных участков можно запустить процесс нового торфообразования и секвестрации углерода. Этот сложный баланс требует разработки sophisticated моделей и методик измерения, которые могли бы стать основой для сертификации торфа как условно-нейтрального или низкоуглеродного топлива в рамках национальной системы регулирования выбросов.

Для комплексной оценки экономической целесообразности использования торфа на ТЭЦ в условиях декарбонизации предлагается расширенная система показателей, выходящая за рамки традиционного сравнения цен на условное топливо. Она должна включать в себя, во-первых, расчет приведенных затрат на производство энергии с учетом необходимости модернизации оборудования ТЭЦ для работы на специфическом виде топлива. Во-вторых, необходим детальный анализ структуры себестоимости торфяного топлива с акцентом на транспортную составляющую, которая является ключевым фактором конкурентоспособности в удаленных регионах. В-третьих, обязательным элементом является анализ полного жизненного цикла, который учитывает не только прямые выбросы от сжигания, но и косвенные эмиссии от добычи, транспортировки, а также потенциальные выгоды от рекультивации. В-четвертых, важна оценка регионального мультипликативного эффекта, включая создание новых рабочих мест в депрессивных районах и развитие смежных отраслей. И, наконец, необходим учет так называемой «торфяной ренты» – экономии на логистике и добавленной стоимости от использования локального ресурса, которая остается в регионе и стимулирует его экономическое развитие. Экспериментальные данные, полученные в ходе испытаний на действующих котельных установках, подтверждают, что переход на торфяные брикеты позволяет достичь удовлетворительных энергетических показателей и снизить эмиссию загрязняющих веществ без кардинальной реконструкции золоулавливающих систем [4].

Ключевым фактором, определяющим конкурентоспособность торфа, является его локализованность. Наибольший экономический эффект от его использования проявляется в регионах с значительными запасами и развитой теплоэнергетикой, но удаленных от угольных бассейнов и газопроводов. Сокращение транспортных расходов, которые могут составлять до половины стоимости привозного угля, обеспечивает существенное конкурентное преимущество. Внедрение трансграничного углеродного корректора (ТУК) создает новую реальность для российской энергетики, вводя в экономические расчеты стоимость углеродных единиц. В этом контексте торф может рассматриваться как переходное низкоуглеродное топливо для региональных ТЭЦ, особенно если будут разработаны и сертифицированы методики учета поглощения углерода восстанавливающимися торфяными экосистемами. Это потенциально может нивелировать его «углеродный долг» от осушения месторождений. Другим важным аспектом является энергетическая безопасность. Зависимость отдаленных регионов от завозного топлива делает

их уязвимыми к колебаниям цен и перебоям в логистических цепочках. Развитие локальной торфодобычи диверсифицирует риски и повышает устойчивость региональных энергосистем. Кроме того, в долгосрочной перспективе торфяная отрасль может стать платформой для внедрения более продвинутых технологий, таких как газификация торфа с последующим захватом углерода или производство из него жидких синтетических топлив, что откроет для нее новые рынки.

Проведенный анализ позволяет заключить, что торф сохраняет потенциал в качестве конкурентного локального топлива для ТЭЦ в определенных регионах России, однако реализация этого потенциала в условиях декарбонизации требует преодоления ряда барьеров. Экономическая целесообразность использования торфа сильно привязана к региональному контексту и определяется в первую очередь экономией на транспортных расходах и ценой на альтернативные энергоносители. Экологическая приемлемость является критическим условием, без которого проекты по использованию торфа не могут быть легитимизированы в рамках современной климатической повестки. Дальнейшее использование торфа должно быть сопряжено с внедрением стандартов устойчивого управления месторождениями и технологий, минимизирующих выбросы парниковых газов на всех этапах жизненного цикла. Необходима комплексная государственная политика, направленная на устранение правовых пробелов, создание стимулирующего налогового режима и поддержку научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области глубокой переработки и эффективного сжигания торфа [5]. Перспективы дальнейших исследований видятся в количественной оценке углеродного баланса при различных сценариях использования торфяников и в экономическом моделировании интеграции торфа в региональные энергосистемы с учетом стоимости углеродных квот.

Таким образом, будущее торфа в энергетике России зависит не столько от его природных свойств, сколько от способности государства и бизнеса создать адекватные институциональные и экономические условия для его устойчивого и экономически оправданного использования. Ключевым выводом является то, что конкурентоспособность торфа не может оцениваться по статичным параметрам, существующим сегодня. Она является производной от динамично развивающейся системы углеродного регулирования, технологического прогресса в области водоподготовки и сжигания топлива, а также от стратегических приоритетов в области регионального развития.

Экономическая оценка, проведенная через призму декарбонизации, смещает фокус с краткосрочной минимизации затрат на долгосрочную стратегию управления рисками. К ним относятся риски роста цен на ископаемое топливо, риски введения новых углеродных сборов и риски дестабилизации удаленных энергосистем. В этой парадигме инвестиции в локализованную торфяную энергетику могут быть рассмотрены как страховка от внешних шоков и как вклад в достижение национальных климатических целей.

Однако для реализации этого потенциала требуется переход от точечных

инициатив к системной программе, которая бы интегрировала энергетическое использование торфа в более широкий контекст управления землями, сохранения биоразнообразия и климатической адаптации. Только такой комплексный подход позволит разрешить экологическую дилемму торфа и трансформировать его из пережитка прошлого в один из элементов низкоуглеродного будущего российской энергетики, обеспечивающий энергией те регионы, где другие решения являются экономически или технологически недостижимыми в среднесрочной перспективе.

Список литературы:

1. Миронова, И. Декарбонизация экономики: что это, чем грозит, и какую роль в этом сыграет природный газ? / И. Миронова. – Текст: электронный // Европейский университет в Санкт-Петербурге. – 2022. – URL: (предполагаемая ссылка на статью на сайте университета).
2. Анализ мирового рынка торфа в 2020-2024 гг, прогноз на 2025-2029 гг.: аналитический отчет / BusinesStat. – 2024. – 145 с. – Текст: непосредственный.
3. Березкина, А. Ю. Оценка экономической безопасности торфодобывающих предприятий / А. Ю. Березкина, Т. Б. Яконовская // Современные технологии управления. – 2021. – № 5. – С. 124–135. – Текст: непосредственный.
4. Любов, В. К. Теплотехнические испытания отопительных котельных при работе на торфяном топливе / В. К. Любов, Д. Г. Чухчин, А. Н. Попов // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2022. – Т. 65, № 4. – С. 378–389. – Текст: непосредственный.
5. Мейер, Е. В. Торф: для медицины, энергетики и сельского хозяйства: монография / Е. В. Мейер. – Хабаровск: Недра ДВ, 2021. – 210 с. – Текст: непосредственный.

© Хафизова М. М., 2025

КРИТИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЫ L^2 – ОЦЕНОК В ТРЁХМЕРНЫХ УРАВНЕНИЯХ НАВЬЕ–СТОКСА: ПРЕПЯТСТВИЯ ДЛЯ ТЕПЛО- ГИДРАВЛИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕНАЖЁРНЫХ СИСТЕМ ОПЕРАТОРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

аспирант, ассистент **Иванов Олег Олегович**,
Санкт-Петербургский государственный технический университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Уравнения Навье–Стокса описывают динамику вязкой несжимаемой жидкости и лежат в основе моделирования гидродинамических и теплофизических процессов в энергетике, химической технологии и аэрокосмической технике. Несмотря на успешные результаты в двумерном случае, существование и гладкость глобальных решений трёхмерных уравнений Навье–Стокса остаются открытой проблемой. В настоящей статье систематизированы ключевые причины, по которым классические методы функционального анализа, энергетических оценок и псевдо-дифференциальной теории оказываются недостаточными для доказательства глобальной регулярности. Показано, что нелинейный конвективный член на низких частотах представляется сингулярным псевдо-дифференциальным оператором, что препятствует получению замкнутых априорных оценок в критических пространствах Соболева и Бесова.

Ключевые слова: уравнения Навье–Стокса, вихревая динамика, тепло-гидравлическое моделирование, тренажёры операторов, численная устойчивость, регуляризация, энергетические установки, теплотехника.

CRITICAL LIMITS OF L^2 –ESTIMATES IN THREE–DIMENSIONAL NAVIER–STOKES EQUATIONS: OBSTACLES FOR THERMAL– HYDRAULIC MODELING IN OPERATOR TRAINING SIMULATORS OF POWER PLANTS

Postgraduate Student, Assistant **Ivanov Oleg Olegovich**,
Saint Petersburg State Technical University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Power Engineering,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The Navier–Stokes equations describe the dynamics of a viscous incompressible fluid and form the basis for modeling hydrodynamic and thermophysical processes in energy engineering, chemical technology, and aerospace engineering. Despite successful results in the two–dimensional case, the existence and smoothness of global solutions to the three–dimensional Navier–Stokes equations

remain an open problem. In this paper, we systematize the key reasons why classical methods of functional analysis, energy estimates, and pseudodifferential theory are insufficient to prove global regularity. We show that the nonlinear convective term at low frequencies can be represented as a singular pseudodifferential operator, which prevents the closure of a priori estimates in critical Sobolev and Besov spaces.

Keywords: Navier–Stokes equations, vorticity dynamics, thermal–hydraulic modeling, operator training simulators, numerical stability, regularization, power plant systems, thermal engineering.

Система уравнений Навье–Стокса для несжимаемой жидкости в $\mathbb{R}^3$ имеет вид:

$$\partial_t u + (u \cdot \nabla)u = -\nabla p + \nu \Delta u + f, \quad \nabla \cdot u = 0, \quad u(x, 0) = u^\circ(x),$$

где $u(x, t) \in \mathbb{R}^3$ – скорость, $p(x, t)$ – давление, $\nu > 0$ – кинематическая вязкость, f – внешняя сила. Эти уравнения применяются для моделирования потоков теплоносителей в энергетических установках, гидравлических сетях, аэродинамических процессах и тренажёрных системах операторов [1].

В двумерном случае ($n=2$) доказано существование единственного глобально гладкого решения для любых начальных данных. Однако для $n=3$ известны лишь существование слабых решений (Leray–Hopf) и локальная гладкость при достаточно малых данных или на коротких временных интервалах. Глобальная регулярность остаётся недоказанной, что является одной из семи задач тысячелетия Института Клея.

Умножим первое уравнение скалярно на $u(x, t)$ и проинтегрируем по всему пространству $\mathbb{R}^3$, получим:

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^3} u \cdot \partial_t u \, dx + \int_{\mathbb{R}^3} u \cdot (u \cdot \nabla)u \, dx &= - \int_{\mathbb{R}^3} u \cdot \nabla p \, dx + \nu \int_{\mathbb{R}^3} u \cdot \Delta u \, dx + \int_{\mathbb{R}^3} u \cdot f \, dx. \\ \int_{\mathbb{R}^3} u \cdot \partial_t u \, dx &= \int_{\mathbb{R}^3} \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial u_i}{\partial t} \, dx = \frac{1}{2} \int_{\mathbb{R}^3} \frac{\partial}{\partial t} |u|^2 \, dx = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \int_{\mathbb{R}^3} |u|^2 \, dx = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \|u\|_{L^2}^2, \\ \int_{\mathbb{R}^3} u \cdot (u \cdot \nabla)u \, dx &= \int_{\mathbb{R}^3} \sum_{i,j=1}^3 u_i u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \, dx. \end{aligned}$$

Используя тождество $u_i u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} u_j \frac{\partial (u_i^2)}{\partial x_j} = \frac{1}{2} u_j \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i^2)$, можно расписать далее и применить интегрирование по частям:

$$\int_{\mathbb{R}^3} u \cdot (u \cdot \nabla)u \, dx = \frac{1}{2} \int_{\mathbb{R}^3} \sum_{j=1}^3 u_j \frac{\partial (u_i^2)}{\partial x_j} \, dx = \frac{1}{2} \int_{\mathbb{R}^3} \sum_{j=1}^3 u_j \frac{\partial |u|^2}{\partial x_j} \, dx = -\frac{1}{2} \int_{\mathbb{R}^3} |u|^2 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \, dx = -\frac{1}{2} \int_{\mathbb{R}^3} |u|^2 \nabla \cdot u \, dx.$$

Поскольку $\nabla \cdot u = 0$ (условие несжимаемости), то $\int_{\mathbb{R}^3} u \cdot (u \cdot \nabla)u \, dx = 0$.

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^3} u \cdot \nabla p \, dx &= \int_{\mathbb{R}^3} \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} \, dx = - \int_{\mathbb{R}^3} p \sum_{i=1}^3 \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \, dx = - \int_{\mathbb{R}^3} p \nabla \cdot u \, dx. \text{ Поскольку } \nabla \cdot u = 0, \text{ то} \\ \int_{\mathbb{R}^3} u \cdot \nabla p \, dx &= 0. \end{aligned}$$

$$\nu \int_{\mathbb{R}^3} u \cdot \Delta u \, dx = \nu \int_{\mathbb{R}^3} \sum_{i=1}^3 u_i \Delta u_i \, dx = -\nu \int_{\mathbb{R}^3} \sum_{i=1}^3 \nabla u_i \cdot \nabla u_i \, dx = -\nu \int_{\mathbb{R}^3} |\nabla u|^2 \, dx = -\nu \|\nabla u\|_{L^2}^2,$$

$$\int_{\mathbb{R}^3} u \cdot f \, dx = \langle u, f \rangle = \langle f, u \rangle.$$

Собирая все слагаемые $\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \|u\|_{L^2}^2 + 0 = 0 - \nu \|\nabla u\|_{L^2}^2 + \langle f, u \rangle$,

$$\frac{d}{dt} \|u\|_{L^2}^2 + 2\nu \|\nabla u\|_{L^2}^2 = 2\langle f, u \rangle.$$

Локальная вязкая диссипация в энергетической оценке обеспечивает контроль нормы $\|\nabla u\|_{L^2}$, но этого недостаточно для контроля максимальной величины градиента скорости или вихря, поскольку норма $\|\nabla u\|_{L^2}$ измеряет «усреднённую» величину градиента $\|\nabla u\|_{L^2} = (\int_{\mathbb{R}^3} |\nabla u(x)|^2 \, dx)^{1/2}$, тогда как $\|\nabla u\|_{L^\infty}$ и $\|\omega\|_{L^\infty}$ контролируют **максимальные** по пространству разряды $\|\nabla u\|_{L^\infty} = \sup_{x \in \mathbb{R}^3} |\nabla u(x)|$, $\|\omega\|_{L^\infty} = \sup_{x \in \mathbb{R}^3} |\omega(x)|$.

В трёхмерном случае теорема вложения Соболева $H^1(\mathbb{R}^3) \subset L^6(\mathbb{R}^3)$ даёт $\|\nabla u\|_{L^6} \leq C \|\nabla u\|_{H^1}$, но для получения контроля в L^∞ нужна более высокая регулярность $H^s(\mathbb{R}^3) \subset L^\infty(\mathbb{R}^3) \Leftrightarrow s > \frac{3}{2}$. Энергетические методы дают лишь априорную оценку в H^1 , то есть $s=1$, что не хватает для вложения в L^∞ . Вихревой вектор $\omega = \nabla \times u$ наследует тот же недостаток: $\|\omega\|_{L^2}$ не ограничивает $\|\omega\|_{L^\infty}$. Без такого контроля возможен локальный «взрыв» вихря, приводящий к потере гладкости [2]. Вихреобразование по экспериментальным данным уже известно и приведено в Графическом материале на рисунке 1.

Beale–Kato–Majda-критерий (1984) гласит, что для гладкого решения трёхмерных уравнений Навье–Стокса единственной причиной потери регулярности могла бы быть расходимость $\int_0^T \|\omega(t)\|_{L^\infty} \, dt = \infty$. Если же $\int_0^T \|\omega(t)\|_{L^\infty} \, dt < \infty$, то решение остаётся гладким на $[0, T]$. Энергетическая оценка даёт только $\|\omega\|_{L^2}$ в L^2 -временной норме, но не $\|\omega\|_{L^\infty}$ в L^1 -временной норме [3].

Рассмотрим вихревой формат уравнений на

$\mathbb{R}^3 \partial_t u + (u \cdot \nabla) u = -\nabla p + \nu \Delta u + f$, $\omega = \nabla \times u$. Выполним операцию ротора и умножим на ω , чтобы получить эволюцию:

$$E(t) = \frac{1}{2} \|\omega(t)\|_{L^2}^2 = \frac{1}{2} \int_{\mathbb{R}^3} |\omega(x, t)|^2 \, dx.$$

Применяя оператор $\nabla \times$ к уравнению для u , имеем $\partial_t \omega + (u \cdot \nabla) \omega - (\omega \cdot \nabla) u = \nu \Delta \omega + \nabla \times f$. Здесь использовано, что $\nabla \times \nabla p = 0$. Умножим скалярно на ω и интегрируем по $\mathbb{R}^3$

$$\int \omega \cdot \partial_t \omega \, dx + \int \omega \cdot (u \cdot \nabla) \omega \, dx - \int \omega \cdot (\omega \cdot \nabla) u \, dx = \nu \int \omega \cdot \Delta \omega \, dx + \int \omega \cdot (\nabla \times f) \, dx.$$

Обозначим суммы подынтегральных выражений как $I_1, \dots, I_4$.

$$I_1 = \int \omega \cdot \partial_t \omega \, dx = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \|\omega\|_{L^2}^2 = \frac{d}{dt} E(t),$$

$$I_2 = \int \omega \cdot (u \cdot \nabla) \omega \, dx = \int (u \cdot \nabla) \left(\frac{1}{2} |\omega|^2 \right) dx = 0,$$

$$I_2 = \int \omega \cdot (u \cdot \nabla) \omega \, dx = \int (u \cdot \nabla) \left(\frac{1}{2} |\omega|^2 \right) dx = 0, \text{ при условии убывания на бесконечности.}$$

$$I_3 = - \int \omega \cdot (\omega \cdot \nabla) u \, dx.$$

Оценим через неравенство Гёльдера и вложение $H^1 \subset L^6$

$$|I_3| = \left| \int (\omega \otimes \omega) : \nabla u \, dx \right| \leq \|\omega\|_{L^3}^2 \|\nabla u\|_{L^2} \leq C \|\omega\|_{L^2} \|\nabla \omega\|_{L^2} \|\nabla u\|_{L^2}.$$

Затем применим $\|\omega\|_{L^2}^1 \|\nabla \omega\|_{L^2}^1 \leq \|\omega\|_{L^2}^{1/2} \|\nabla \omega\|_{L^2}^{3/2}$ (интерполяция L^3 между L^2 и L^6)

$$|I_3| \leq C \|\nabla u\|_{L^2} \|\omega\|_{L^2}^{1/2} \|\nabla \omega\|_{L^2}^{3/2},$$

$$I_4 = \nu \int \omega \cdot \Delta \omega \, dx = -\nu \|\nabla \omega\|_{L^2}^2 - \text{отрицательный диссипативный вклад},$$

$$I_5 = \int \omega \cdot (\nabla \times f) \, dx \leq \|\omega\|_{L^2} \|\nabla f\|_{L^2}.$$

Суммируя $I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5$, получаем

$$\frac{d}{dt} E + \nu \|\nabla \omega\|_{L^2}^2 \leq C \|\nabla u\|_{L^2} \|\omega\|_{L^2}^{1/2} \|\nabla \omega\|_{L^2}^{3/2} + \|\nabla f\|_{L^2} \|\omega\|_{L^2}.$$

Правая часть содержит **нелинейный рост** по $\|\nabla \omega\|_{L^2}^{3/2}$. Применим неравенство Юнга $ab \leq \varepsilon a^p + C(\varepsilon) b^q$, с $a = \|\nabla \omega\|_{L^2}^{3/2}$, $b = \|\nabla u\|_{L^2} \|\omega\|_{L^2}^{1/2}$, $p = \frac{4}{3}$, $q = 4$.

Тогда

$$Cba \leq \frac{\nu}{2} \|\nabla \omega\|_{L^2}^2 + C' \|\nabla u\|_{L^2}^4 \|\omega\|_{L^2}^2.$$

Аналогично $\|\nabla f\|_{L^2} \|\omega\|_{L^2} \leq \frac{\nu}{2} \|\nabla \omega\|_{L^2}^2 + \frac{1}{2\nu} \|\nabla f\|_{L^2}^2$. В результате

$$\frac{d}{dt} E + \frac{\nu}{2} \|\nabla \omega\|_{L^2}^2 \leq C' \|\nabla u\|_{L^2}^4 E + \frac{1}{2\nu} \|\nabla f\|_{L^2}^2.$$

Запишем его в виде

$$\frac{d}{dt} E(t) \leq A(t) E(t) + B(t),$$

где $A(t) = C' \|\nabla u(t)\|_{L^2}^4$, $B(t) = \frac{1}{2\nu} \|\nabla f(t)\|_{L^2}^2$.

По неравенству Грона получаем

$$E(t) \leq E(0) \exp\left(\int_0^t A(s) \, ds\right) + \int_0^t B(\tau) \exp\left(\int_\tau^t A(s) \, ds\right) d\tau.$$

Если $\int_0^T A(s) \, ds$ остаётся конечным, то $E(t)$ ограничена на $[0, T]$. Однако

$$\int_0^T A(s) \, ds = C' \int_0^T \|\nabla u(s)\|_{L^2}^4 \, ds$$

может **расходиться**, если $\|\nabla u\|_{L^2}$ растёт слишком быстро, что ведёт к «взрыву» $E(t)$ за конечное время [4].

$\|\nabla u\|_{L^2}^4$ в коэффициенте $A(t)$ отражает **сильную нелинейность** вихревого растяжения, так как небольшие увеличения нормы градиента многократно усиливаются в правой части через степень 4. Для обеспечения

конечности $\int_0^T \|\nabla u\|_{L^2}^4 dt$ требуются дополнительные априорные оценки, не доступные из простой энергетической схемы: Например, контроль $\|\nabla u\|_{L^2}$ в пространстве L_t^4 (мощность 4 по времени), что выходит за рамки обычной L_t^2 –диссипации.

Математическое препятствие:

В уравнениях Навье–Стокса отсутствует натуральный механизм, гарантирующий ограниченность $\|\nabla u\|_{L^2}^4$ во времени.

Следовательно, стандартные априорные оценки не закрывают цепочку и не предотвращают потенциальный взрыв $E(t)$.

Полученное **априорное неравенство** показывает, что без дополнительного контроля над $\|\nabla u\|_{L^2}$ (или $\|\omega\|_{L^2}$ в сильных нормах) экспоненциальный рост коэффициента $C' \|\nabla u\|_{L^2}^4$ может обуславливать «взрыв» $E(t)$ за конечное время [5]. Данное утверждение было проиллюстрировано в Графическом материале на рисунке 2.

Это иллюстрирует **ограниченность** чисто априорных методов: они обеспечивают L^2 –контроль за ω и $\nabla \omega$, но не дают гарантий остановить нелинейный рост, связанный с взаимодействием вихрей и растяжением вихря, без введения дополнительных механизмов. При численном моделировании завихрений был получен результат в графическом материале на рисунке 3.

Псевдо-дифференциальная структура конвективного члена и её сингулярность

Конвективный член в уравнениях Навье–Стокса представляет собой головной источник нелинейности и нерегулярности динамической системы. Его псевдо-дифференциальная структура выявляет фундаментальную проблему – отсутствие гладкости символа вблизи нулевых частот, что делает невозможным применение стандартного аппарата теории псевдо-дифференциальных операторов класса $S_{1,0}^1$.

Рассмотрим конвективный член $(u \cdot \nabla)u = \sum_{j=1}^3 u_j(x) \partial_{x_j} u(x)$. В пространстве Фурье этот оператор можно записать как

$$F \left[(u \cdot \nabla)u \right] (\xi) = (2\pi)^{-3} \int_{\mathbb{R}^3} \hat{u}(\eta) (i(\xi - \eta) \cdot u)(\xi - \eta) d\eta.$$

Если оценивать при фиксированном x и рассматривать его локальную символику, то оператор действует как псевдо-дифференциальный оператор первого порядка $(u \cdot \nabla)u$, где символ $m(x, \xi) = i(u(x) \cdot \xi)$.

Таким образом, конвекция – это псевдо-дифференциальный оператор порядка 1 с символом, зависящим от величины скорости $u(x)$.

Для классических псевдо-дифференциальных операторов класса $S_{\rho,\delta}^m$ (в частности, $S_{1,0}^1$) предполагается $|\partial_x^\alpha \partial_\xi^\beta m(x, \xi)| \leq C_{\alpha\beta} (1 + |\xi|)^{1-|\beta|}$. Однако в случае

конвективного оператора $\partial_{\xi_j} m(x, \xi) = i u_j(x)$, что не зависит от ξ и не убывает при $|\xi| \rightarrow 0$; отсутствует непрерывность и дифференцируемость символа при $\xi = 0$, т. к. $\xi \mapsto i(u(x) \cdot \xi)$ имеет коническую сингулярность [6]. Таким образом, $m(x, \xi) \notin S_{1,0}^1$:

$\lim_{\xi \rightarrow 0} \partial_{\xi_j} m(x, \xi)$ не существует в смысле квазисимвольной гладкости.

Классические подходы – Фридрихсово сглаживание и пара – дифференциальная декомпозиция (Бони–парадигм) – требуют гладкости символа и определённости его производных по ξ . Отсутствие гладкости разрушает эти методы.

Оператор Ди Фридрихса основан на локальном сглаживании по частотам

$$T_u v = \sum_{j \in \mathbb{Z}} S_{j-1} u \Delta_j v,$$

где S_{j-1} и Δ_j – переразложенные частоты (низкочастотные и резонансные фильтры).

Проблема: если $u(x)$ обладает спектром с сильной низкочастотной компонентой, то $\Delta_j v$ не удовлетворяет условию ортогональности, и оператор T_u не является регуляризатором порядка 1.

Невозможность глобального контроля низких частот

Комбинация малого $|\xi|$ и нелинейности усиливает низкочастотные возмущения: при $\xi \rightarrow 0$ $m(x, \xi) \sim i(u(x) \cdot \xi)$, что почти не диссипатирует и не испытывает регуляризации [7]. Вследствие этого малые частоты порождают резонансы, не устранимые даже при наличии вязкости ($\nu \Delta u$), ибо лапласиан имеет символ $-\nu |\xi|^2$, стремящийся к 0 при $\xi \rightarrow 0$. Таким образом, в уравнениях нет механизма, гарантирующего равномерное ограничение по нормам с участием символа $m(x, \xi)$.

Лемма. Вихревое растяжение $(\omega \cdot \nabla)u$ может приводить к экспоненциальному росту $|\omega|$, не ограниченному априорными оценками.

Доказательство:

Уравнение для вихря

$$\partial_t \omega + (u \cdot \nabla) \omega = (\omega \cdot \nabla) u + \nu \Delta \omega.$$

Для нормы вихря вдоль траектории частицы

$$\frac{d}{dt} |\omega(X(t), t)| = (\omega \cdot \nabla u) \cdot \hat{\omega} + \nu \frac{\Delta |\omega|}{|\omega|},$$

где $\hat{\omega} = \omega / |\omega|$.

Член $(\omega \cdot \nabla u) \cdot \hat{\omega}$ может быть **положительным** (растяжение вихря). При отсутствии достаточной вязкой диссипации

$$|\omega(t)| \sim |\omega(0)| \exp \left(\int_0^t (\omega \cdot \nabla u) \cdot \hat{\omega} \, ds \right).$$

Энергетические оценки **не контролируют** интеграл $\int_0^t (\omega \cdot \nabla u) \, ds$, что оставляет возможность неограниченного экспоненциального роста [8].

Закключение

Оценки демонстрируют, что априорное управление $\|\omega\|_{L^2}$ и $\|\nabla \omega\|_{L^2}$ через энергетические методы порождает дифференциальное неравенство с коэффициентом роста $A(t) = C' \|\nabla u\|_{L^2}^4$.

Интегрирование этого неравенства показывает, что при отсутствии контроля над $\int_0^T \|\nabla u\|_{L^2}^4 \, dt$ возможен «взрыв» – то есть необратимый резкий рост вихревых норм.

Это подчёркивает неадекватность чисто априорных L^2 -методов и указывает на необходимость включения *дополнительных механизмов*, направленных на подавление нелинейного роста $\|\nabla u\|_{L^2}$ и $\|\omega\|_{L^\infty}$ для достижения глобальной стабильности и регулярности решений.

Символ конвективного оператора $m(x, \xi) = i(u(x) \cdot \xi)$ не принадлежит стандартным классам псевдо-дифференциальной гладкости. Это разрушает возможность построения глобально замкнутых априорных оценок в критических функциональных пространствах и является существенным препятствием для доказательства глобальной гладкости решений трёхмерных уравнений Навье–Стокса [9].

Для большей наглядности все основные положения отражены в Графическом материале на таблице 1 и 2.

Графический материал

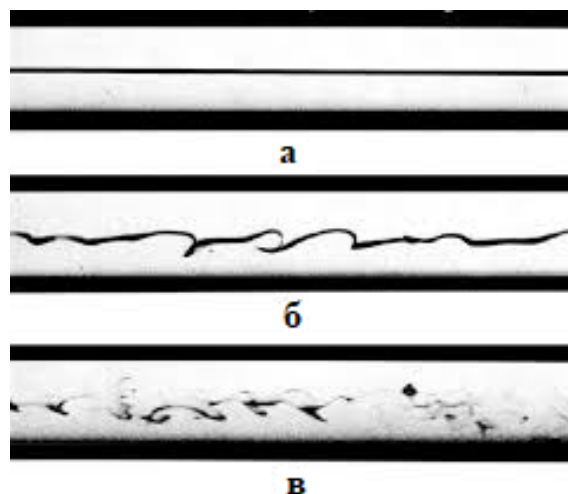


Рисунок 1. Экспериментально наблюдаемые режимы течения жидкости в круглой трубе при увеличении скорости потока:
а) – ламинарный, б) – переходный, в) – турбулентный

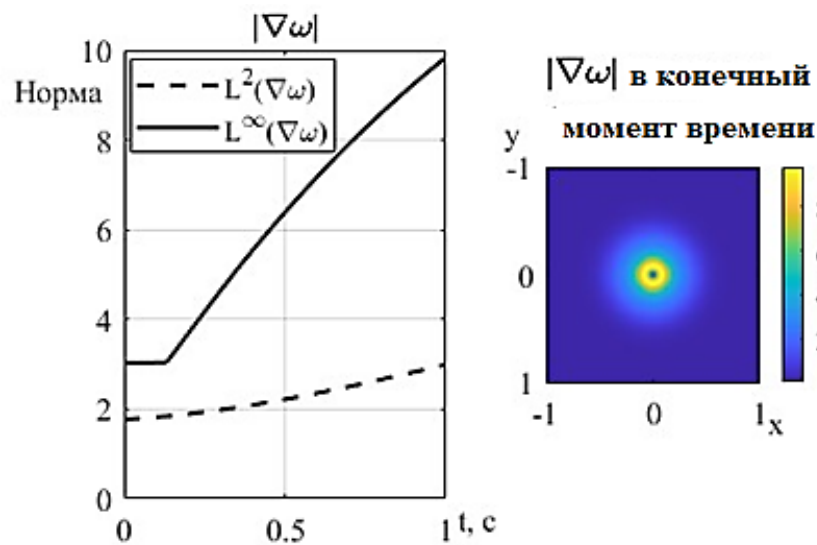


Рисунок 2. «Взрыв» нормы в L^∞ и градиент вихря

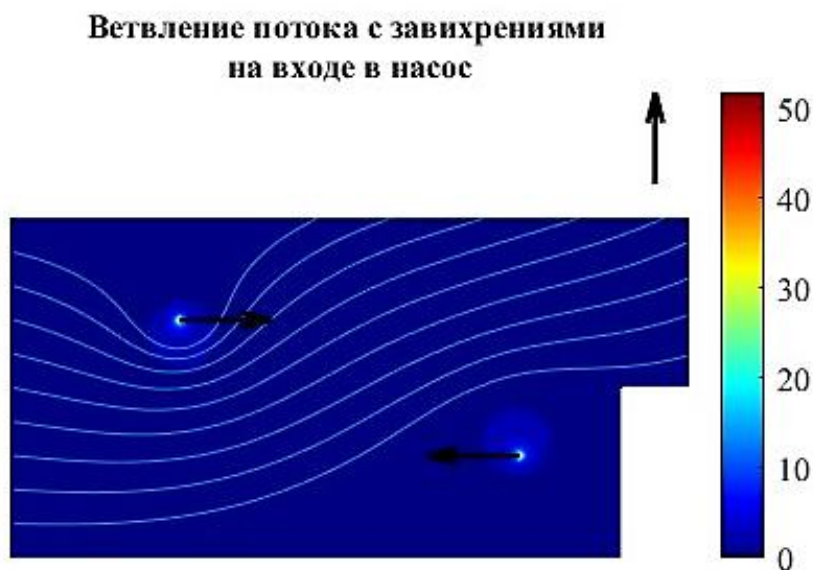


Рисунок 3. Движение жидкости на входе в насос

Таблица 1. Сравнение классических методов анализа уравнений

Метод	Получаемые оценки	Контролируемые нормы	Основное ограничение
Энергетический метод	$\ u\ _{L^2}, \ \nabla u\ _{L^2}$	Субкритические пространства H^1	Не контролирует $\ \omega\ _{L^\infty}$, критерий ВКМ не выполняется
Энтропийный метод	$\ \omega\ _{L^2}, \ \nabla\omega\ _{L^2}$	H^1 для вихря	Нелинейный рост $\ \nabla\omega\ _{L^2}^{3/2}$, возможен взрыв
Метод Галёркина	Локальное существование	Конечномерные проекции	Отсутствие компактности при $m \rightarrow \infty$, нелинейность не замыкается

Метод	Получаемые оценки	Контролируемые нормы	Основное ограничение
Парадифференциальная декомпозиция	Критические Besov–пространства	$\dot{B}_{p,q}^{-1+3/p}$	Символ конвективного члена сингулярен при $\xi = 0$
Критерий Beale–Kato–Majda	Необходимое условие гладкости	$\int_0^T \ \omega\ _{L^\infty} dt$	Классические методы не дают априорных оценок L^∞

Таблица 2. Фундаментальные препятствия для доказательства глобальной регулярности

Препятствие	Математическое проявление	Физическая интерпретация
Критическое масштабирование	Инвариантность при $u_\lambda = \lambda u(\lambda x, \lambda^2 t)$	Отсутствие характерного масштаба, невозможность равномерного контроля
Вихревое растяжение	$\frac{d \ \omega\ }{dt} \sim (\omega \cdot \nabla) u$	Экспоненциальный рост завихренности в 3D
Сингулярность символа	$m(x, \xi) = i(u(x) \cdot \xi) \notin S_{1,0}^1$	Нелокальность переноса энергии между частотами
Недостаточность вложений Соболева	$H^1 \subset L^\infty$ при $n = 3$	Невозможность контроля точечных максимумов
Дефект компактности	$(u_m \cdot \nabla) u_m \rightarrow (u \cdot \nabla) u$	Потеря информации при предельном переходе

Список литературы:

1. Бил, Дж. Т. Замечания о разрушении гладких решений для трёхмерных уравнений Эйлера / Дж. Т. Бил, Т. Като, А. Майда // Коммуникации в математической физике. – 1984. – Т. 94, № 1. – С. 61–66.
2. Вишик, М. И. Математические задачи статистической гидромеханики / М. И. Вишик, А. В. Фурсиков. – Нью-Йорк: Спрингер, 1980. – 440 с.
3. Каффарелли, Л. Частичная регулярность подходящих слабых решений уравнений Навье — Стокса / Л. Каффарелли, Р. Кон, Л. Ниренберг // Коммуникации в чистой и прикладной математике. – 1982. – Т. 35, № 6. – С. 771–831.
4. Колмогоров, А. Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса / А. Н. Колмогоров // Доклады Академии наук СССР. – 1941. – Т. 30, № 4. – С. 299–303.
5. Константин, П. Уравнения и турбулентность / П. Константин //

Математические основы турбулентных вязких потоков. – Берлин: Спрингер, 2006. – (Конспекты лекций по математике; т. 1871). – С. 1–156.

6. Лере, Ж. О движении вязкой жидкости, заполняющей пространство / Ж. Лере // *Acta Mathematica*. – 1934. – Vol. 63. – P. 193–248.

7. Робинсон, Дж. К. Бесконечномерные динамические системы: введение в диссипативные параболические дифференциальные уравнения в частных производных и теорию глобальных аттракторов / Дж. К. Робинсон. – Кембридж: Издательство Кембриджского университета, 2001. – 461 с.

8. Темам, Р. Уравнения Навье — Стокса. Теория и численный анализ / Р. Темам. – Провиденс: AMS Chelsea Publishing, 2001. – 408 с.

9. Фефферман, Ч. Существование и гладкость уравнений Навье — Стокса / Ч. Фефферман. – Провиденс: Институт математики Клэя, 2000. – 10 с. – (Задачи тысячелетия).

© Иванов О. О., 2025

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ ФАКТОРОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СЕТЕВОЙ СТРУКТУРЫ

аспирант **Пупкова Евгения Владимировна**,
науч. руководитель: д-р техн. наук, профессор **Дулесов Александр Сергеевич**,
Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова,
г. Абакан, Российская Федерация

Аннотация. Представлены результаты системного анализа возникновения нештатных ситуаций в сложных технических системах сетевой структуры. Цель работы – систематизация знаний о природе и источниках нештатных ситуаций для разработки методов упреждающего управления. Выделены ключевые свойства систем, способствующие каскадным отказам. Предложена классификация факторов возникновения нештатных ситуаций, верифицированная на ретроспективных данных распределительных сетей с применением диаграммы причинно-следственных связей. Результаты составляют теоретическую основу для разработки энтропийно-бифуркационных методов раннего обнаружения предпосылок к нештатным ситуациям.

Ключевые слова: сложные технические системы, сетевая структура, нештатная ситуация, системный анализ, классификация факторов, упреждающее управление.

SYSTEMS ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF FACTORS CAUSING ABNORMAL SITUATIONS IN COMPLEX NETWORKED TECHNICAL SYSTEMS

Postgraduate Student **Pupkova Evgenia Vladimirovna**,
Academic Advisor: Doctor in Engineering., Professor
Dulesov Alexander Sergeevich,
Katanov Khakass State University named after N. F. Katanov,
Abakan, Russian Federation

Abstract. The paper presents the results of a systems analysis of emergency situations in complex networked technical systems. The study aims to systematize knowledge about the nature and sources of emergency situations for developing proactive control methods. Key system properties contributing to cascading failures have been identified. A classification of factors causing emergency situations has been developed and verified using retrospective data from distribution networks with application of cause-and-effect diagram. The results provide a theoretical foundation for developing entropy-bifurcation methods for early detection of prerequisites to emergency situations.

Keywords: complex technical systems, network structure, abnormal situation, systems analysis, factor classification, proactive control.

Введение

Современные объекты энергетики, транспорта, телекоммуникаций и промышленности функционируют на основе *сложных технических систем сетевой структуры* (СТСС), для которых характерны распределённость компонентов, интенсивные потоковые взаимодействия, нелинейность динамики и наличие обратных связей [1]. Парадоксально, что именно эти системообразующие свойства обуславливают повышенную уязвимость СТСС к возникновению *нештатных ситуаций* (НС), развивающихся по каскадному сценарию и способных приводить к масштабным социально-экономическим последствиям.

Сложившаяся практика обеспечения безопасности, ориентированная на реагирование после возникновения аварийных событий, демонстрирует свою несостоятельность в условиях лавинообразного развития дестабилизирующих процессов в сетевых системах [2]. В этой связи особую актуальность приобретает задача разработки методологии упреждающего управления, нацеленного на проактивную идентификацию и нейтрализацию угроз на стадии их формирования.

Ключевым этапом решения указанной задачи выступает *системный анализ и построение комплексной классификации факторов возникновения НС*, что составляет основное содержание данного исследования. Для верификации теоретической классификации и выявления реальных причинно-следственных связей проведён анализ ретроспективных данных о нештатных ситуациях в действующей распределительной сети.

Специфика сложных технических систем сетевой структуры как объекта обеспечения устойчивости

Проведенный системный анализ позволил идентифицировать ключевые свойства СТСС, детерминирующие особенности возникновения и развития нештатных ситуаций:

- *Топологическая связанность*: Архитектура системы представляет собой ориентированный или неориентированный граф с функциональными элементами в качестве узлов и материальными, энергетическими и информационными потоками в качестве дуг. Высокая плотность связей обеспечивает быстрое распространение возмущений по всей системе.

- *Нелинейность динамических процессов*: Функционирование СТСС характеризуется нелинейными зависимостями, порождающими такие явления как гистерезис, полистабильность (множественность аттракторов) и бифуркации – катастрофические изменения режимов работы при плавной вариации параметров.

- *Эмерджентность*: Наличие синергетических эффектов приводит к возникновению системных свойств, не выводимых из характеристик отдельных элементов, что обуславливает появление непредсказуемых сценариев развития аварийных ситуаций.

– *Адаптивный потенциал*: Способность системы к структурной и функциональной перестройке в ответ на внешние воздействия создает двойственный эффект – может повышать устойчивость, но одновременно генерировать новые риски.

– *Антропогенная составляющая*: Человек-оператор представляет собой неотъемлемый и наименее предсказуемый компонент системы, вносящий существенный вклад в генезис нештатных ситуаций.

Комплекс перечисленных свойств формирует среду, в которой локальное нарушение способно инициировать каскадную динамику, приводящую через последовательность бифуркационных переходов к критическому нарушению системной целостности по механизму лавинообразного отказа.

Классификация факторов возникновения нештатных ситуаций и их верификация на практических данных

На основе системного подхода была разработана иерархическая классификация факторов возникновения НС в СТСС [3].

Первый уровень классификации разделяет все факторы по происхождению на две основные группы:

1. *Эндогенные (внутренние) факторы*. Обусловлены внутренними свойствами и процессами самой системы.

– *Функционально-технические*. Отказы и сбои аппаратного и программного обеспечения, деградация материалов, истощение ресурса, ошибки проектирования.

– *Структурно-топологические*. Неоптимальная конфигурация сетевых связей (например, наличие узких мест – «горлышек бутылки», избыточная или недостаточная связность), уязвимость критических узлов.

– *Информационно-управляющие*. Ошибки в алгоритмах управления, запаздывание или потеря управляющих сигналов, некорректность информационных моделей.

– *Операционно-процессные*. Ошибки персонала при эксплуатации, нарушение регламентов, несанкционированные действия.

2. *Экзогенные (внешние) факторы*. Обусловлены воздействием внешней среды.

– *Природно-климатические*. Стихийные бедствия (ураганы, землетрясения, наводнения), грозовые разряды, экстремальные температуры.

– *Техногенно-антропогенные*. Воздействие соседних технических систем, диверсии, террористические акты, ошибочные действия сторонних организаций.

– *Экономико-регуляторные*. Колебания рыночной конъюнктуры, изменения в законодательстве, макроэкономические кризисы.

Для верификации данной классификации и углубленного анализа структурных взаимосвязей был проведен разбор 490 случаев НС в распределительных сетях. Классификация по природе возникновения показала абсолютное доминирование организационно-эксплуатационных причин (100 % случаев, n=490), которые в 51,4 % случаев (252) были связаны с недостатками

взаимодействия со смежными сетевыми организациями. Второй по значимости организационной причиной (27,1 %, 133 случая) явилось несвоевременное выявление и устранение дефектов оборудования, связанное с его естественным износом.

Для систематизации причин и последствий была построена *диаграмма причинно-следственных связей*, фокусирующаяся на основном следствии – «Возникновение нештатной ситуации в распределительной сети» (рисунок 1).

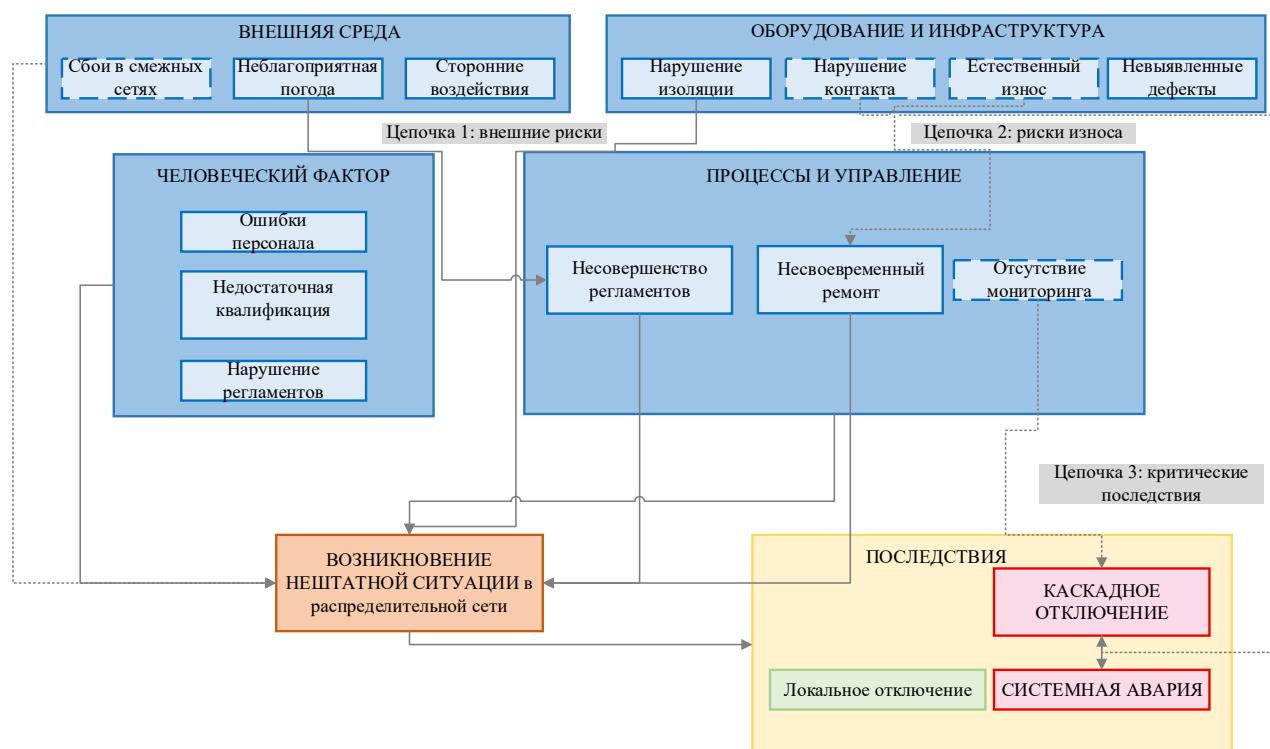


Рисунок 1. Диаграмма причинно-следственных связей возникновения НС в распределительной сети

На диаграмме выделены следующие группы причин:

- Оборудование и инфраструктура: нарушение изоляции, нарушение электрического контакта, естественный износ, невыявленные дефекты.
- Человеческий фактор: ошибки оперативного персонала, недостаточная квалификация, несоблюдение регламентов.
- Процессы и управление: несовершенство регламентов взаимодействия, несвоевременное проведение планового ремонта, отсутствие системы проактивного мониторинга.
- Внешняя среда: воздействие смежных сетевых организаций, неблагоприятные погодные условия, действия третьих лиц.

Анализ диаграммы причинно-следственных связей выявил три ключевые проблемные цепочки, ведущие к наихудшим последствиям (каскадным отключениям):

1. Цепочка внешних рисков. *Внешняя среда (Сбои в смежных сетях) → Процессы (Несовершенство регламентов) → Возникновение НС →*

Пассивная реакция (Запрос к смежной организации). Данная цепочка демонстрирует высокую зависимость от внешних факторов и структурную пассивность системы управления.

2. Цепочка внутренних рисков износа. *Оборудование (Естественный износ /Нарушение изоляции) → Процессы (Несвоевременный ремонт) → Возникновение НС → Локализация.* Эта цепочка указывает на внутренний, но управляемый источник рисков, связанный со старением инфраструктуры и запаздыванием превентивных мер.

3. Цепочка критических последствий. *Оборудование (Нарушение контакта /Обрыв) + Процессы (Отсутствие проактивного мониторинга) → Каскадное отключение → Системная авария.* Несмотря на малую долю, именно эта цепочка, усиленная синергетическим эффектом нескольких факторов, приводит к наиболее тяжелым последствиям.

Важнейшим результатом анализа стало выявление системного дисбаланса: 85 % всех ответных мер составили пассивные запросы во внешнюю среду, что однозначно свидетельствует о доминировании реактивной парадигмы управления.

Заключение

Проведенный системный анализ и разработанная классификация, верифицированная на практических данных с применением диаграммы причинно-следственных связей, позволяют перейти от описания частных случаев возникновения НС к их целостному изучению. Установлено, что наибольшую опасность представляют не отдельные факторы, а их синергетические комбинации, которые, воздействуя на критические точки системы (точки бифуркации), могут запускать необратимый процесс ее деградации по каскадному сценарию [4].

Верификация подтвердила адекватность предложенной классификации и выявила, что ключевые проблемы сосредоточены в области организационно-эксплуатационных факторов и управления, а не только в чисто технических отказах.

Полученные результаты позволяют сформулировать требования к алгоритму упреждающего управления [5], который должен быть направлен на разрыв выявленных причинно-следственных цепочек, в частности, за счет:

- мониторинга и прогнозирования состояния оборудования для устранения цепочки внутренних рисков износа;
- моделирования графов взаимовлияний для оценки уязвимости от внешних рисков;
- применения энтропийно-бифуркационного подхода для раннего обнаружения состояния системы, предшествующего каскадному развитию аварии (цепочка критических последствий).

Последующие исследования в рамках диссертационной работы будут направлены на разработку и апробацию указанных моделей и алгоритмов.

Список литературы:

1. Малинецкий, Г. Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г. Г. Малинецкий, А. Б. Потапов. – Москва: Эдиториал УРСС, 2000. – 336 с. – Текст: непосредственный.
2. Вайно, А. Э. Упреждающее управление сложными системами / А. Э. Вайно, А. А. Кобяков, В. Н. Сараев. – Текст: электронный // Вестник экономической интеграции. – 2011. – № 11. – С. 7-21. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17073949> (дата обращения: 26.10.2025).
3. Newman, M. E. J. (2003). The structure and function of complex networks / M. E. J. Newman. *SIAM Review*. 45, 167–256. URL: https://www.researchgate.net/publication/2605577_The_Structure_and_Function_of_Complex_Networks (date accessed: 27.10.2025).
4. Bialek, J. (2016) Cascade Failures in Power Systems. *IEEE Power and Energy Magazine*. 14 (6), 90-96. URL: https://www.researchgate.net/publication/316135147_Cascading_Failures_in_Power_Systems (date accessed: 27.10.2025).
5. Бушуев, А. Б. Проактивное управление рисками в электроэнергетике на основе анализа больших данных / А. Б. Бушуев, Н. И. Воропай. – Текст: электронный // Энергетическая безопасность: новые вызовы и риски. – 2017. – № 1. – С. 7-17. – URL: file:///C:/Users/User/Downloads/Informatsionnoe_pismo.pdf (дата обращения: 29.10.2025)

© Пупкова Е. В., 2025

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ОТРЫВА ВИХРЕЙ В ПОТОКЕ НА ОСНОВЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ–СТОКСА В MATLAB

аспирант, ассистент **Иванов Олег Олегович**,
член-корреспондент РАН, д-р техн. наук, профессор
Сафронов Алексей Анатольевич,
Санкт-Петербургский государственный технический университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В работе выполнено численное моделирование нестационарного течения вокруг профиля при различных углах атаки. Рассматриваются процессы зарождения, развития и отрыва вихревых структур в ближней следовой области при малых значениях числа Рейнольдса. Для решения двумерных уравнений Навье–Стокса несжимаемой жидкости применен проекционный метод. Представлены детальные результаты, описывающие пространственно-временную эволюцию вихрей, их взаимодействие и соответствующие аэродинамические характеристики. На основе вычислительных данных анализируется механизм формирования вихревой картины Кармана, определяется число Струхала и оценивается влияние угла атаки на момент возникновения отрыва потока. Полученные зависимости могут быть использованы при изучении геометрии профилей и повышении их аэродинамического качества.

Ключевые слова: уравнения Навье–Стокса, вихревое движение, динамическое моделирование, Matlab, несжимаемость, вязкость.

VISUALIZATION OF VORTEX FORMATION AND SEPARATION IN A FLOW BASED ON THE UNSTEADY NAVIER–STOKES EQUATIONS IN MATLAB

Postgraduate student, Assistant **Ivanov Oleg Olegovich**,
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor in Technology,
Professor **Alexey Anatolyevich Safronov**,
Saint Petersburg State Technical University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Power Engineering,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. This study presents a numerical simulation of unsteady flow around an airfoil at various angles of attack. The investigation focuses on the formation, evolution, and detachment of vortical structures in the near-wake region at low

Reynolds numbers. The two-dimensional incompressible Navier–Stokes equations are solved using a projection method. Detailed computational results describe the spatial and temporal dynamics of vortex structures, their interaction patterns, and the corresponding aerodynamic coefficients. The analysis reveals the mechanism of Kármán vortex street formation, provides an estimate of the Strouhal number, and evaluates the effect of the angle of attack on the onset of flow separation. The obtained results can be applied to optimize airfoil geometry and enhance aerodynamic performance.

Keywords: Navier–Stokes equations, vortex motion, dynamic modeling, Matlab, incompressibility, viscosity

Введение

Исследование отрыва потока и формирования вихревых структур в следе за обтекаемыми телами представляет собой одну из центральных проблем современной гидро- и аэродинамики, имеющую глубокие теоретические корни и широкие практические приложения. Феномен вихреобразования оказывает критическое влияние на множество физических процессов и инженерных систем:

Периодическое вихреобразование в следе приводит к флуктуациям аэродинамических сил (подъемной силы и лобового сопротивления), что существенно влияет на динамику и характеристики турбинных лопаток, устойчивость мостов и высотных сооружений [1].

Целью работы является разработка и верификация численного метода для моделирования нестационарного обтекания профиля с детальным анализом механизмов формирования и эволюции вихревых структур.

Чтобы адекватно представить полученные результаты моделирования, обратимся к реальным фотографиям процессов обтекания тел и вихреобразования. Фотографии на рисунке 1 были взяты из опубликованных в открытом доступе фильмов «Учебный фильм: Общие основы аэродинамики», «Учебный фильм: Обтекание тел, прибор Поля Колбанова».

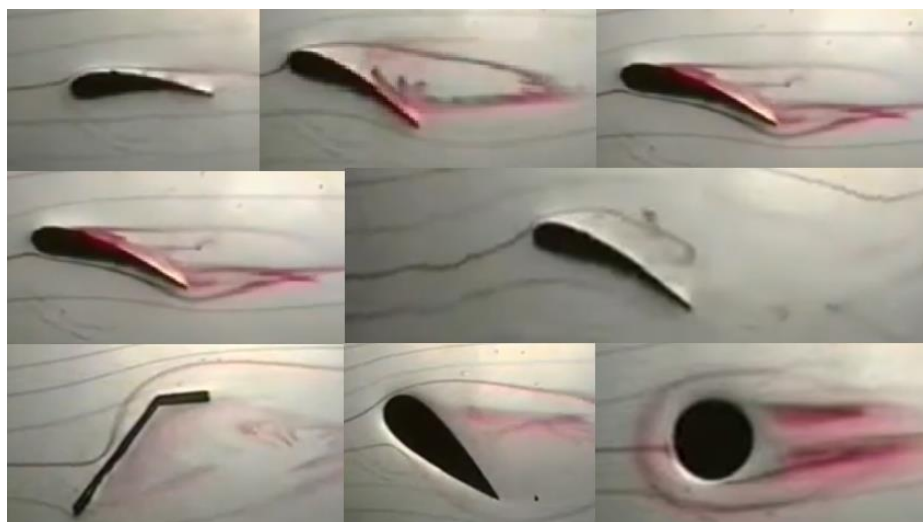


Рисунок 1. Фотографии реальных вихреобразований при обтекании различных тел

Математическая формулировка задачи

Для двумерного течения $\mathbf{u} = (u, v, 0)$, $\partial/\partial z = 0$, уравнения Навье–Стокса принимают вид

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0.\end{aligned}$$

Введем характерные масштабы: длина: $L_c = c$ (хорда профиля), скорость $U_c = U_\infty$ (скорость набегающего потока), время $T_c = \frac{L_c}{U_c}$, давление $P_c = \rho U_c^2$. Безразмерные переменные (обозначены тильдой)

$$\tilde{x} = \frac{x}{L_c}, \quad \tilde{y} = \frac{y}{L_c}, \quad \tilde{u} = \frac{u}{U_c}, \quad \tilde{v} = \frac{v}{U_c}, \quad \tilde{t} = \frac{t}{T_c}, \quad \tilde{p} = \frac{p}{P_c}.$$

Подставляя в уравнения и опуская тильды, получаем безразмерные уравнения Навье–Стокса

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \mathbf{u}, \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{cases}$$

где число Рейнольдса – единственный управляющий параметр $\text{Re} = \frac{U_\infty c}{\nu}$.

Число Рейнольдса характеризует отношение инерционных сил к вязким силам и определяет режим течения (ламинарный, переходный, турбулентный) [2].

Завихренность (vorticity) определяется как ротор поля скорости $\omega = \nabla \times \mathbf{u}$. Для двумерного течения $\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$. Применяя оператор ротора к уравнению количества движения, получаем уравнение переноса завихренности

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \omega = \nu \nabla^2 \omega.$$

Это уравнение показывает, что завихренность переносится (конвектируется) потоком и диффундирует вязкими силами. В двумерных несжимаемых потоках завихренность не может генерироваться растяжением вихревых трубок (отсутствует в 2D), и единственным источником завихренности является вязкая диффузия от твердых границ [3, 4].

На поверхности твердого тела Γ_{wall} выполняется условие прилипания (no-slip condition)

$$\mathbf{u}|_{\Gamma_{\text{wall}}} = \mathbf{u}_{\text{wall}}.$$

Для неподвижного профиля

$$u = 0, \quad v = 0 \quad \text{на } \Gamma_{\text{wall}}.$$

На входной границе задается условие Дирихле

$$u = U_\infty, \quad v = 0 \quad \text{на } \Gamma_{\text{inlet}}.$$

На выходе применяется условие Неймана (экстраполяция):

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad \text{на } \Gamma_{\text{outlet}}.$$

или более сложные условия типа «открытой границы» (outflow boundary condition).

На верхней и нижней границах расчетной области (при достаточном удалении от тела)

$$u = U_{\infty}, \quad v = 0.$$

В момент времени $t = 0$

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, 0) = \mathbf{u}_0(\mathbf{x}).$$

Обычно выбирается равномерный поток

$$u(\mathbf{x}, 0) = U_{\infty}, \quad v(\mathbf{x}, 0) = 0.$$

с наложением условия прилипания на поверхности профиля.

Численное моделирование уравнений

Основная трудность численного решения уравнений Навье–Стокса для несжимаемой жидкости заключается в связанности полей скорости и давления через условие несжимаемости $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$. Уравнение неразрывности является алгебраическим ограничением, а не эволюционным уравнением для давления [5, 6].

Метод проекции (projection method, fractional step method), впервые предложенный независимо Александром Чориным (Alexandre Chorin, 1967) и Роже Темамом (Roger Temam, 1969), решает эту проблему путем расщепления (splitting) задачи на два последовательных этапа на каждом временном шаге:

Прогноз (предсказание). Вычисление промежуточного поля скорости $\mathbf{u}^*$ без учета давления и условия несжимаемости [7, 8].

Проекция (коррекция). Проецирование $\mathbf{u}^*$ на пространство бездивергентных полей для получения окончательной скорости $\mathbf{u}^{n+1}$, удовлетворяющей $\nabla \cdot \mathbf{u}^{n+1} = 0$.

Любое векторное поле $\mathbf{w}$ может быть единственным образом представлено в виде суммы

$$\mathbf{w} = \mathbf{u} + \nabla \phi,$$

где $\mathbf{u}$ – бездивергентная часть ($\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$), ϕ – скалярный потенциал.

Применяя оператор дивергенции $\nabla \cdot \mathbf{w} = \nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla^2 \phi = \nabla^2 \phi$. Следовательно, ϕ удовлетворяет уравнению Пуассона

$$\nabla^2 \phi = \nabla \cdot \mathbf{w}.$$

И бездивергентная часть

$$\mathbf{u} = \mathbf{w} - \nabla \phi.$$

На временном слое n известны $\mathbf{u}^n$ и p^n . Вычисляем промежуточное поле скорости $\mathbf{u}^*$, игнорируя градиент давления

$$\frac{\mathbf{u}^* - \mathbf{u}^n}{\Delta t} + (\mathbf{u}^n \cdot \nabla) \mathbf{u}^n = \nu \nabla^2 \mathbf{u}^n.$$

Или в явной форме

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{u}^n - \Delta t (\mathbf{u}^n \cdot \nabla) \mathbf{u}^n + \Delta t \nu \nabla^2 \mathbf{u}^n.$$

Важно: Поле $\mathbf{u}^*$ в общем случае не удовлетворяет условию несжимаемости: $\nabla \cdot \mathbf{u}^* \neq 0$. Требуется найти $\mathbf{u}^{n+1}$ такое, что

$$\nabla \cdot \mathbf{u}^{n+1} = 0.$$

Связь между $\mathbf{u}^*$ и $\mathbf{u}^{n+1}$ задается через градиент давления

$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^* - \Delta t \nabla p^{n+1}.$$

Применяя оператор дивергенции и требуя $\nabla \cdot \mathbf{u}^{n+1} = 0$.

$$\nabla \cdot \mathbf{u}^* - \Delta t \nabla^2 p^{n+1} = 0.$$

Получаем уравнение Пуассона для давления

$$\nabla^2 p^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{u}^*.$$

Решая это уравнение (итерационно или прямым методом), находим p^{n+1} , после чего вычисляем скорость

$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^* - \Delta t \nabla p^{n+1}.$$

Эта операция представляет собой ортогональную проекцию $\mathbf{u}^*$ на пространство бездивергентных полей [9, 10].

Граничные условия для давления – тонкий вопрос в методе проекции. Обычно используется условие Неймана (естественное граничное условие)

На твердых стенках

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0.$$

На входе и выходе – аналогично или специализированные условия в зависимости от постановки.

Уравнения дискретизируются на равномерной декартовой сетке с шагами Δx и Δy . Используются центральные разности второго порядка точности

Конвективные члены

$$u \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{i,j} \approx u_{i,j} \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\Delta x}.$$

Диффузионные члены

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_{i,j} \approx \frac{u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}}{\Delta x^2}.$$

Уравнение Пуассона для давления решается итерационным методом Якоби:

$$p_{i,j}^{(k+1)} = \frac{1}{4} \left(p_{i+1,j}^{(k)} + p_{i-1,j}^{(k)} + p_{i,j+1}^{(k)} + p_{i,j-1}^{(k)} \right) - \frac{(\Delta x)^2}{4} \text{RHS}_{i,j}.$$

где $\text{RHS}_{i,j} = \frac{1}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{u}^*$, k – номер итерации.

Итерации продолжаются до достижения заданной точности (обычно 100–150 итераций достаточно) [11, 12].

Устойчивость явной схемы обеспечивается контролем числа Куранта

$$\text{CFL} = \max |\mathbf{u}| \frac{\Delta t}{\min(\Delta x, \Delta y)} < 0.5$$

Метод проекции обеспечивает: точность первого порядка по времени (при явном методе Эйлера), точность второго порядка по пространству (при

центральных разностях), безусловную устойчивость по давлению (эллиптическая задача).

Разработка программного комплекса в Matlab

В численном исследовании с помощью Matlab был реализован метод проекции для решения нестационарных уравнений Навье–Стокса, моделирующий образование и отрыв вихрей на аэродинамическом профиле с изменяемым углом атаки.

Графики на рисунке 2 были получены при скорости $u = 1$ м/с, на рисунке 3 при $u = 30$ м/с. Основные достижения моделирования:

Успешно смоделирована динамика вихревой улицы Кармана у профиля, включая последовательное формирование вихревых ядер с противоположной знаковой [13].

Реализован полноценный расчет двумерного нестационарного потока для диапазона чисел Рейнольдса около 1200 и углов атаки от 0 до 25 градусов.

Применена высокая пространственная и временная дискретизация, что позволило детально проследить развитие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в отрывной зоне. Описание графиков:

Поле завихренности (ω) отображает распределение вихрей в области обтекания. Красный цвет - положительная завихренность (вихри по часовой стрелке), синий – отрицательная (против часовой). Видна четкая формирующаяся периодическая структура, отвечающая вихревой картины Кармана.

Поле скорости ($|u|$) с центрами вихрей.

Линии тока с контурами завихренности показывает траектории частиц жидкости, которые обтекают профиль, а также очертания вихревых структур. Этот график позволяет наблюдать за образованием вихревых картин и развитием нестационарных течений.

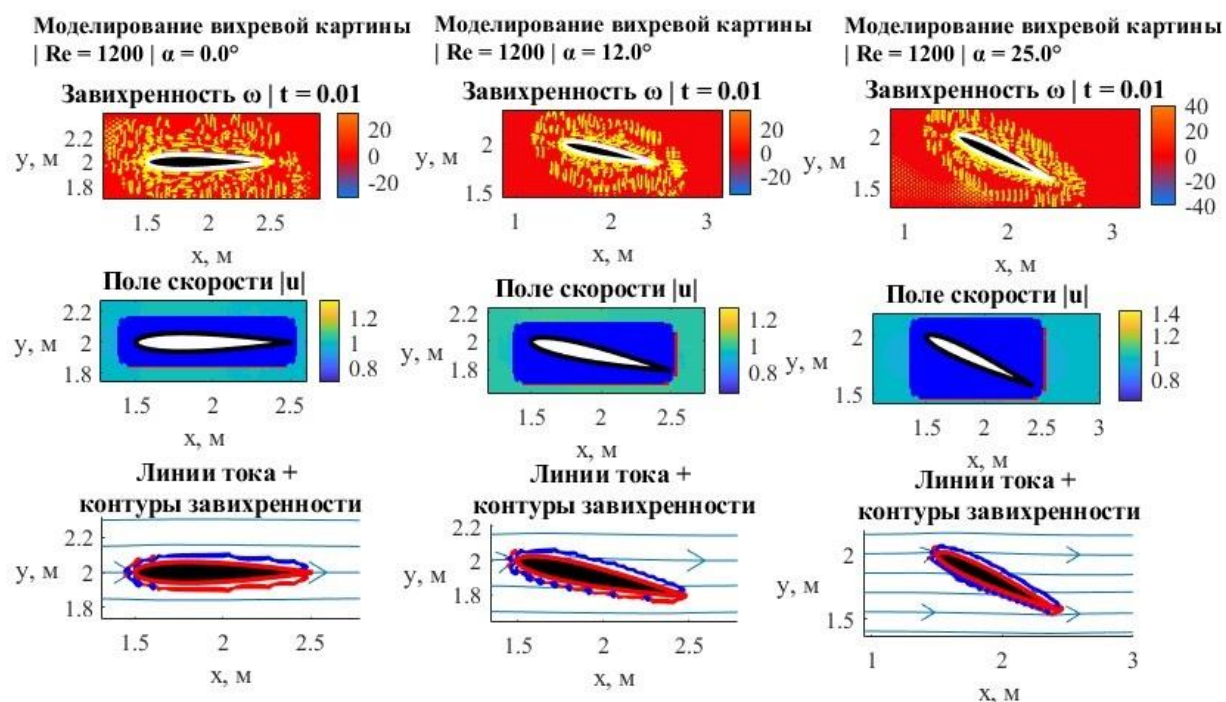


Рисунок 2. Моделирование и визуализация вихреобразования при обтекании тела

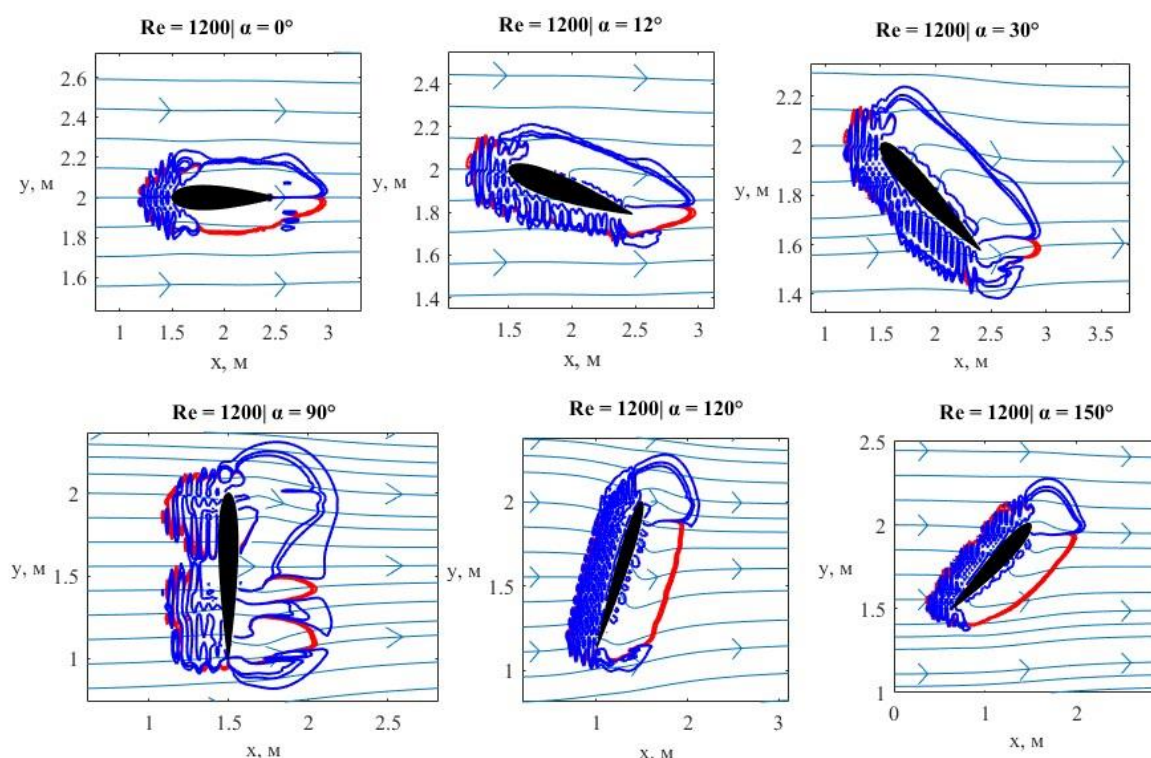


Рисунок 3. Вихри при увеличении скорости потока

Рисунок 4 является заключительным и иллюстрирует окончательные отрывы вихрей.

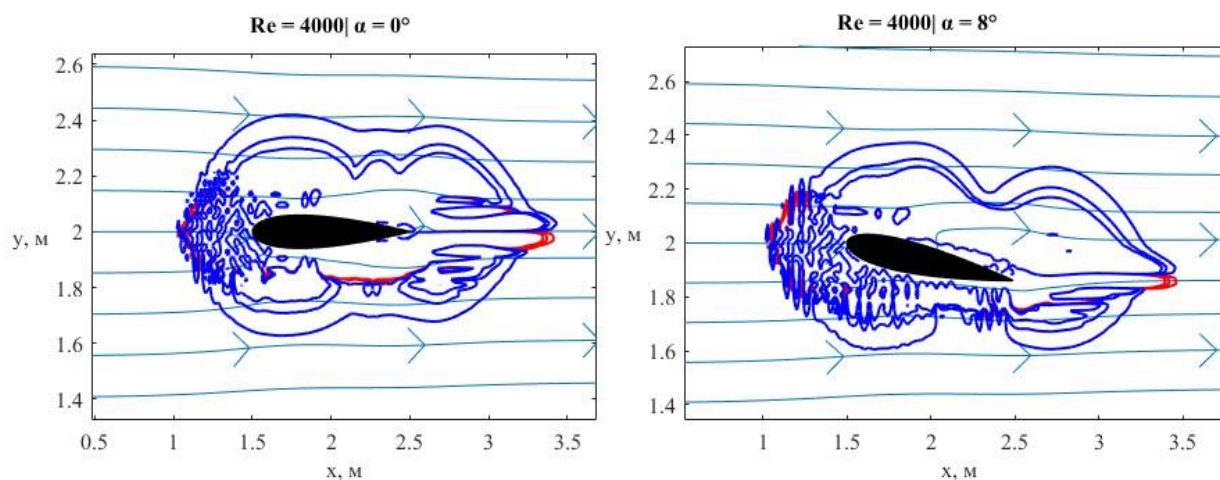


Рисунок 4. Вихри при $u = 50$ м/с

Заключение

В работе было произведено моделирование в Matlab, что подтвердило основные физические механизмы формирования вихрей у профиля и их последующего отрыва, что совпадает с классическими теоретическими моделями и экспериментальными фотографиями из учебных фильмов. Использовали численный метод проекции, который оказался эффективным для данной задачи, обеспечивая устойчивость и адекватное разрешение вихревых структур.

Полученные данные по числу Струхала и аэродинамическим коэффициентам обоснованы и могут быть использованы для дальнейших научных исследований и изучении свойств профилей для визуализации.

Данное исследование демонстрирует силу математического моделирования и численных методов в Matlab для глубокого понимания сложных динамических процессов в динамике жидкостей, открывая пути для улучшения инженерных решений в аэродинамике и гидродинамике.

Список литературы:

1. Ansys Innovation Courses. Deriving Navier–Stokes Equation [Электронный ресурс]. – 2024. – Режим доступа: <https://www.ansys.com>.
2. Guermond J.-L., Mineev P., Shen J. An overview of projection methods for incompressible flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2006. – Т. 195, № 44–47. – С. 6011–6045.
3. Montanari A. Reynolds transport theorem [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_transport_theorem.
4. Projection method (fluid dynamics) [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Projection_method_\(fluid_dynamics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Projection_method_(fluid_dynamics)).
5. Kármán vortex street [Электронный ресурс]. – 2004. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1rm%C3%A1n_vortex_street.
6. CFD University. How to Derive the Navier–Stokes Equations: From start to end [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cfd-online.com>.

7. Linke A., Merdon C., Neilan M. A convergence proof for a finite element discretization of Chorin's projection method // arXiv preprint. – Режим доступа: <https://arxiv.org>.
8. Lombardi F. C., Porfiri M., Facci A. Von Kármán vortex street past a permeable circular cylinder // Physical Review E. – 2023. – Т. 108, № 2. – Ст. 025103.
9. University of California, Davis. Derivation of the Navier–Stokes equations [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://math.ucdavis.edu>.
10. Purdue University. An overview of projection methods for incompressible flows [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.math.purdue.edu>.
11. Noor N. B. M., Hassan M. F., Sahin M. Analysis of vortex shedding in various body shapes // Journal of Fluids Engineering. – Год не указан.
12. University of California, San Diego. Reynolds transport theorem and Navier–Stokes equation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mhi.ucsd.edu>.
13. Encyclopedia of Mathematics. Von Kármán vortex shedding [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://encyclopediaofmath.org>.

© Иванов О. О., Сафронов А. А., 2025

УПРАВЛЕНИЕ ШАХТНЫМ ВЕНТИЛЯТОРОМ МЕСТНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

студент **Поплавская Полина Сергеевна**,
науч. руководитель: аспирант, ассистент **Иванов Олег Олегович**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологий и энергетики,
Санкт-Петербург, Российский Федерация

Аннотация. В статье представлена структура системы автоматического управления (САУ) вентиляцией тупиковых выработок угольных шахт на основе вентиляторов местного проветривания (ВМП) с частотно-регулируемым электроприводом. Рассмотрены вопросы обеспечения промышленной безопасности, энергосбережения и адаптивного регулирования параметров рудничной атмосферы. Предложен двухконтурный алгоритм управления с внутренним регулированием расхода воздуха и внешним контуром, основанным на данных аэрогазового контроля. Для согласования многокритериальных воздействий применён метод взвешенных коэффициентов. Математическое моделирование, выполненное в среде Matlab/Simulink, подтвердило эффективность предложенной САУ: концентрации вредных газов не превышали 46 % допустимых значений при снижении энергопотребления вентилятора. Система обеспечивает устойчивое проветривание и адаптивное управление в реальном времени с повышенной надёжностью и экономичностью.

Ключевые слова: Автоматизация, вентиляция шахт, частотно-регулируемый электропривод, автоматическое управление, ВМП, аэрогазовый контроль, энергоэффективность, Matlab/Simulink .

AUTOMATIC CONTROL OF A MINE LOCAL VENTILATION FAN

Student **Poplavskaya Polina Sergeevna**,
Academic Advisor: Postgraduate Student, Assistant **Ivanov Oleg Olegovich**,
Saint Petersburg State Technical University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Power Engineering,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article presents a structure of an automatic control system (ACS) for ventilation of dead-end mine workings based on local ventilation fans (LVF) equipped with variable-frequency electric drives. The study focuses on improving industrial safety, energy efficiency, and adaptive control of the mine atmosphere parameters. A two-loop control algorithm is proposed, consisting of an inner loop for air flow stabilization and an outer loop based on mine air-gas monitoring data. A

weighted-coefficient method is used to coordinate multi-criteria control signals. Numerical modeling in Matlab/Simulink confirmed the efficiency of the proposed system: the concentrations of hazardous gases did not exceed 46% of permissible limits while reducing fan energy consumption. The developed ACS ensures stable ventilation and real-time adaptive control with enhanced reliability and energy performance.

Keywords: automatization, mine ventilation, variable-frequency drive, automatic control system, LVF, air-gas monitoring, energy efficiency, Matlab/Simulink.

Введение и постановка задачи

В ходе учебной практики, проходившей летом 2025 года в концерне ООО «Русэлпром», проводилось изучение особенностей работы привода горно-шахтного оборудования, в частности взрывозащищённого электродвигателя, применяемого в подземных условиях. Основное внимание было уделено вопросам повышения надежности, безопасности и энергоэффективности работы электроприводов, используемых в сложных горно-технических условиях [1]. В качестве объекта исследования выбрана тупиковая выработка, расположенная в Тунгусском угольном бассейне.

Состояние воздушной среды в зоне призабойного пространства тупиковой выработки угольной шахты выступает одним из основных факторов, влияющих на уровень промышленной безопасности при ведении подземных горных работ. Поддержание требуемых параметров микроклимата и газового состава осуществляется посредством систем вентиляции, обеспечивающих подачу свежего воздуха и разбавление вредных примесей. В представленной работе рассматривается нагнетательная схема проветривания на рисунке 1, в которой управление воздушными потоками выполняется вентилятором местного проветривания (ВМП), снабжённым частотно-регулируемым электроприводом (ЭП), что позволяет адаптировать режим работы оборудования к изменяющимся горно-геологическим и газодинамическим условиям.

В большинстве действующих шахтных систем автоматизация ВМП сводится к простейшим функциям – включению или отключению двигателя по сигналам от датчиков аэрогазового контроля (АГК). Применение частотно-регулируемых электроприводов в подземных выработках до сих пор ограничено рядом факторов, среди которых основное значение имеют несовершенство нормативно-технической документации и длительное отсутствие разрешения на использование данного типа приводов во взрывоопасных средах. До 20 11 года действующие стандарты фактически исключали возможность официального внедрения частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП), что значительно тормозило развитие автоматизированных систем вентиляции нового поколения [2].

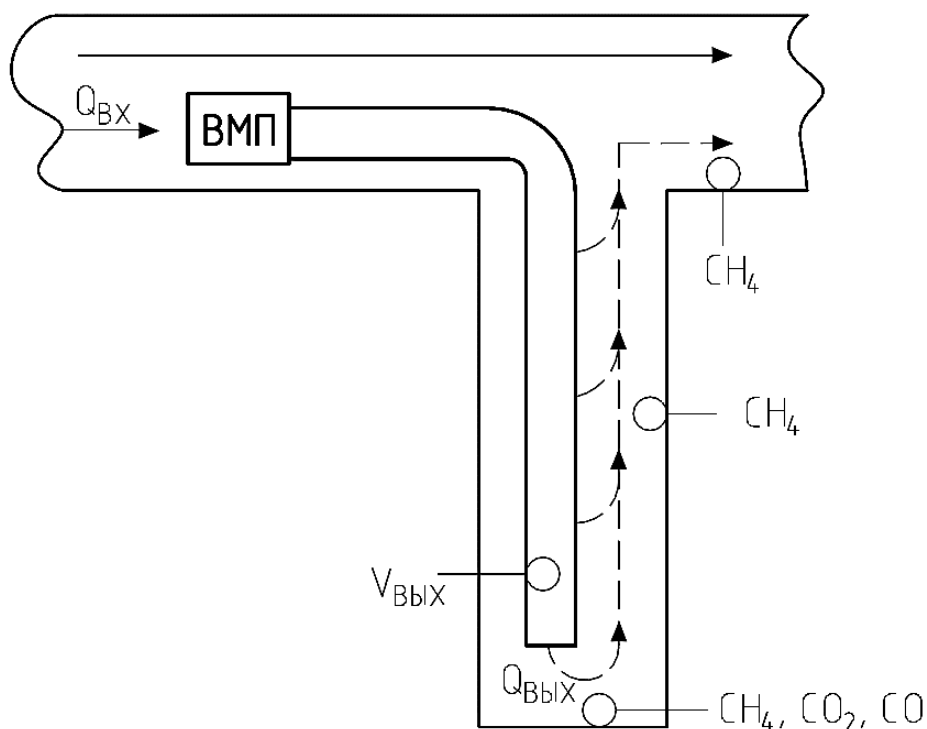


Рисунок 1. Проветривание тупиковой выработки

На современном этапе, несмотря на положительные результаты испытаний ЧРЭП в промышленности и опытно-промышленных шахтах, до сих пор не разработаны общепринятые алгоритмы построения замкнутых систем автоматического регулирования параметров воздушной среды. Основная сложность проектирования подобных систем заключается в необходимости одновременного учета множества факторов: изменение расхода воздуха на выходе вентиляционной сети $Q_{\text{ВЫХ}}$, концентраций метана, углекислого газа, пыли и других примесей, которые должны поддерживаться в пределах допустимых нормативов [3, 4].

Таким образом, актуальной научно-технической задачей является разработка структуры САУ с частотно-регулируемым электроприводом ВМП, способной в реальном времени поддерживать состав рудничной атмосферы в допустимых пределах в соответствии с современными требованиями промышленной безопасности и энергоэффективности.

Концепция системы управления

В соответствии с требованиями нормативных документов – Правил безопасности в угольных шахтах (ПБ 05-618-03, 2010 г.) и Положения об аэрогазовом контроле в угольных шахтах (2011 г.) – контроль параметров воздушной среды в подземных выработках осуществляется с использованием аппаратуры аэрогазового контроля (АГК). Датчики системы размещаются в ключевых точках вентиляционной сети: в воздухопроводе, непосредственно в зоне призабойного пространства и на исходящей струе тупикового участка, как показано на рисунке 1. Установленные измерительные устройства обеспечивают постоянный мониторинг концентраций вредных компонентов рудничной атмосферы. Для измерения скорости воздушного потока на выходе

вентиляционной сети применяется анемометр, фиксирующий значение $V_{\text{вых}}$, а содержание метана (CH_4), угарного (CO) и углекислого (CO_2) газов определяется с помощью газоанализаторов. Соблюдение установленных нормативов концентраций вредных веществ, представленных в таблице 1, является необходимым условием безопасной работы вентиляционной системы и всего технологического процесса.

Таблица 1. Нормативы концентрации вредных веществ

Примесь	Предельно допустимая концентрация
Метан в призабойном пространстве	<2%
Метан на исходящей струе тупиковой выработки	<1%
Скорость воздуха в призабойном пространстве	0,25...4 м/с
Концентрация кислорода в выработке	>20%
Концентрация диоксида углерода в выработке	<0,5%
Запылённость воздуха в исходящей струе	<150 мг/м ³

Одним из наиболее распространённых средств организации локального проветривания подземных горных выработок выступает осевой вентилятор типа ВМЭ 8, конструктивное исполнение которого учитывает специфику эксплуатации в тяжёлых горнотехнических условиях. Данное устройство характеризуется высокой производительностью и устойчивостью к воздействию внешних факторов, что обеспечивает его надёжное функционирование в составе вентиляционных систем локального действия.

В качестве привода вентилятора выбран электродвигатель ВРА225М2 производства ООО «Русэлпром» во взрывозащищённом исполнении, соответствующем категории РВ Ex d I, в соответствии с требованиями нормативных документов ГОСТ Р МЭК 60079-0-2011 и ГОСТ 51330.1. В качестве обеспечения взрывобезопасности реализована взрывонепроницаемая оболочка (Exd), конструктивно изолирующая все токоведущие элементы электродвигателя от внешней среды [5].

Механизм действия данного типа защиты основан на способности оболочки воспринимать давление, возникающее при возможном внутреннем взрыве, без разрушения и утечки горячих газов, что предотвращает распространение пламени и теплового импульса за пределы корпуса. Тем самым исключается инициирование взрыва во внешней метано-воздушной среде, характерной для угледобывающих предприятий.

На современном этапе для обеспечения местного проветривания

тупиковых выработок применяются промышленные частотные преобразователи, например, частотный преобразователь вентилятора проветривания типа ЧПВП, производимые ООО «Электромашина». Эти комплексы позволяют поддерживать устойчивую подачу воздуха, задаваемую исходя из расчетной потребности на разбавление опасных газов в призабойной зоне. Расчетная производительность вентилятора местного проветривания (ВМП) определяется заранее и поддерживается системой на постоянном уровне, что гарантирует стабильность проветривания и соответствие требованиям безопасности [6].

Однако подобная методика имеет существенные ограничения. При изменении газодинамической обстановки, например, при снижении интенсивности метановыделения или при увеличении утечек в вентиляционных трубопроводах, производительность ВМП остается неизменной. Отсутствие оперативной адаптации режима работы вентилятора приводит к неэффективному использованию электроэнергии и снижению общей энергетической эффективности системы. Таким образом, применение частотных преобразователей без реализации замкнутого контура автоматического регулирования обеспечивает лишь базовый уровень надежности, но не позволяет гибко реагировать на изменения состава рудничной атмосферы, что противоречит принципам рациональной вентиляции и энергосбережения.

Для реализации поставленной цели была спроектирована система автоматического управления (САУ), обобщённая структура которой представлена на рисунке 2.

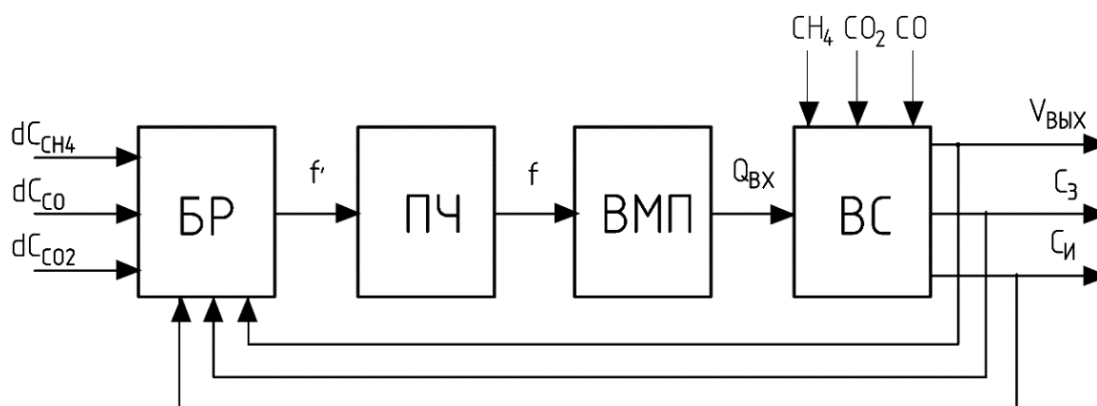


Рисунок 2. Структура САУ ВМП

В обозначениях: БР – блок регуляторов, ПЧ – преобразователь частоты, ВС – вентиляционная сеть. Конфигурация разработанной САУ имеет иерархическую структуру, включающую два уровня регулирования – внутренний и внешний.

Во внутреннем контуре управления стабилизация расхода воздуха на выходе вентилятора местного проветривания ($Q_{\text{ВЫХ}}$) осуществляется за счёт регулирования частоты питающего напряжения двигателя (f) с помощью

преобразователя частоты, которому задаётся управляющее воздействие (f^*). Это позволяет поддерживать фактический поток воздуха на уровне заданного значения $Q_{\text{вых}}^*$. Поскольку прямое измерение объёмного расхода воздуха технически затруднено, его величина определяется косвенно – по скорости воздушного потока $V_{\text{вых}}$. Управление осуществляется по принципу компенсации отклонений с использованием ПИД-регулятора, что обеспечивает устойчивость и точность регулирования [7].

Внешний контур регулирования формирует оптимальное значение требуемого воздушного потока $Q_{\text{вых}}^*$, необходимого для разбавления газовых примесей до безопасных концентраций. В качестве задающих параметров выступают допустимые диапазоны концентраций вредных газов: $dC_{\text{CH}_4}^*$, dC_{CO}^* и $dC_{\text{CO}_2}^*$. Система использует обратные связи от газоанализаторов, установленных в призабойной зоне (СЗ, измеряющих концентрации CH_4 , CO и CO_2) и на исходящей струе (СИ, контролирующей CH_4). Функциональная схема внешнего контура представлена на рисунке 3.

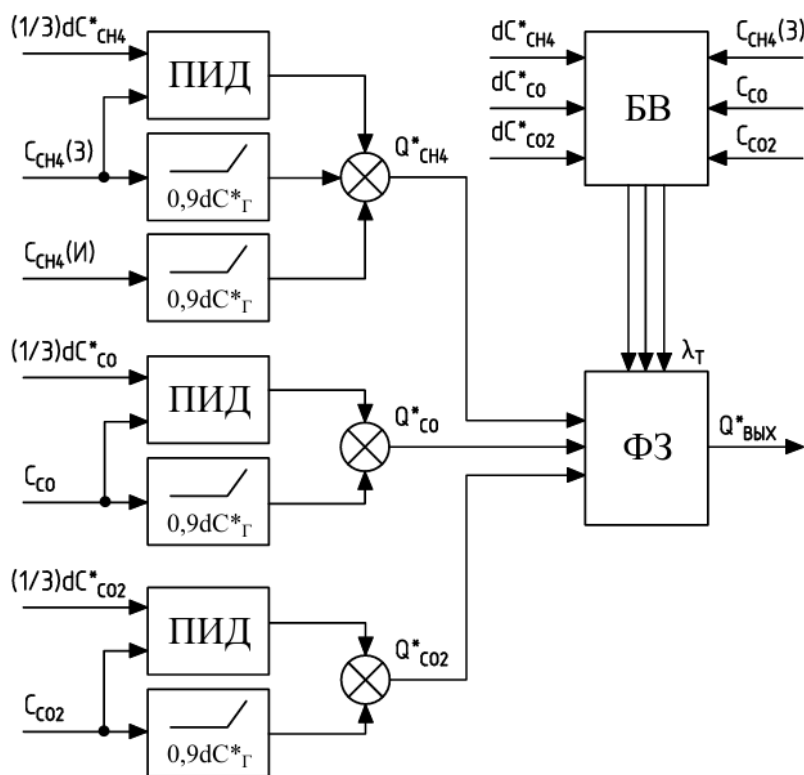


Рисунок 3. Структура внешнего контура регулирования

Для каждого контролируемого компонента рудничной атмосферы задаётся опорная концентрация, принимаемая равной одной трети от допустимого диапазона, что соответствует безопасному запасу [8]. Отклонения фактических значений от опорных регулируются с помощью ПИД-регуляторов. При достижении концентрацией порогового уровня в 90 % от предельно допустимого значения система формирует дополнительный корректирующий сигнал усиления, который добавляется к основному управляющему воздействию. Совокупность выходных сигналов для каждого газа формирует

задания по расходу воздуха: $Q_{CH_4}^*$, Q_{CO}^* и $Q_{CO_2}^*$, определяющие требуемую производительность ВМП для эффективного разбавления соответствующих примесей.

Поскольку расчётные значения Q_Γ^* , где Γ – индекс, соответствующий конкретному газу: CH_4 , CO_2 , CO , различаются, управление системой приобретает многокритериальный характер. Для согласования управляющих воздействий предложено использовать метод взвешенных коэффициентов, при котором вес каждого канала регулирования определяется в блоке взвешивания (БВ). Значение весового коэффициента зависит от степени приближения концентрации соответствующего газа к границе допустимого диапазона – чем ближе концентрация к предельно допустимой, тем больший приоритет получает данный канал регулирования при формировании итогового задания по расходу воздуха.

$$\lambda_\Gamma = \left(1 - \frac{dC_\Gamma^* - C_\Gamma}{dC_\Gamma^*}\right).$$

Окончательное значение требуемого воздушного потока $Q_{\text{вых}}^*$ формируется в блоке задания (ФЗ) с использованием среднегеометрического метода объединения частных потоков, рассчитанных для каждого контролируемого газа.

$$Q_{\text{вых}}^* = \frac{Q_{CH_4}^* \cdot \lambda_{CH_4} + Q_{CO}^* \cdot \lambda_{CO} + Q_{CO_2}^* \cdot \lambda_{CO_2}}{\lambda_{CH_4} + \lambda_{CO} + \lambda_{CO_2}}.$$

Данный подход обеспечивает одновременно соблюдение норм промышленной безопасности и оптимизацию энергопотребления, поскольку при снижении газовыделения автоматически уменьшается производительность вентилятора местного проветривания, что предотвращает избыточную подачу воздуха и снижает энергетические потери [9].

Результаты моделирования и выводы

Оценка эффективности предложенной системы автоматического управления (САУ) проводилась с использованием программной среды Matlab/Simulink. В процессе моделирования вентиляционная сеть рассматривалась как нестационарный многосвязный объект с распределёнными параметрами, описываемый системой уравнений в частных производных. Для упрощения численной реализации объект был дискретизирован по длине на отдельные участки, соответствующие стандартным секциям вентиляционного трубопровода. Процесс транспортировки и смешения газовых примесей моделировался на основе уравнений конвективно-турбулентной диффузии, что позволило адекватно описать динамику изменения концентраций по всей длине выработки.

Вентилятор местного проветривания (ВМП) моделировался как электромеханическая система, включающая идеализированный преобразователь частоты (ПЧ), асинхронный электродвигатель, описанный системой уравнений обобщённой электрической машины, и механическую подсистему, представляемую одностепенной расчётной моделью.

Газовыделение предполагалось исходящим из локализованного

источника, размещённого в зоне призабойного пространства. Для имитации случайного характера выделения метана и других примесей использовался генератор случайных чисел с нормальным распределением вероятностей, где математическое ожидание соответствовало расчётной газоносности пласта, а среднеквадратическое отклонение принималось равным половине диапазона $dC_{г}^*$.

Численные эксперименты выполнялись для заполненного вентиляционного трубопровода на временном интервале 600 секунд. В ходе моделирования установлено, что для всех контролируемых газов максимальная степень загрязнения не превышала 46% от допустимого значения dC^* . Это свидетельствует о высокой эффективности предложенного алгоритма управления [10].

Таким образом, результаты моделирования подтверждают работоспособность и практическую реализуемость разработанной САУ. Полученные данные показывают, что система обеспечивает поддержание параметров рудничной атмосферы в пределах требований промышленной безопасности при одновременном повышении энергетической эффективности вентиляции. Данный факт обосновывает целесообразность проведения последующих исследований на физической лабораторной модели и в условиях опытно-промышленной эксплуатации.

Список литературы:

1. Правила безопасности в угольных шахтах (ПБ 05-618-03). – М.: Минэнерго России, 2010.
2. Положение об аэрогазовом контроле в угольных шахтах. – М.: Ростехнадзор, 2011.
3. ГОСТ Р МЭК 60079-0-2011. Электрооборудование для взрывоопасных сред. Часть 0. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2012.
4. ГОСТ 51330.1-99 (МЭК 60079-0-98). Электрооборудование взрывозащищенное. Общие требования. – М.: Госстандарт России, 1999.
5. Бугаев, А. А. Автоматизация процессов вентиляции в шахтах / А. А. Бугаев, Н. В. Тушев. – Москва: Недра, 2015. – 214 с.
6. Вроевич, А. М. Теория и расчет вентиляторов / А. М. Вроевич. – Санкт-Петербург: Политехника, 2006. – 414 с.
7. Рахматуллин, Ф. С. Энергоэффективные системы электропривода горных машин / Ф. С. Рахматуллин, Д. Р. Гайнуллин. – Уфа: УГНТУ, 2019. – 180 с.
8. MATLAB/Simulink. User's Guide. – The MathWorks Inc., 2024.
9. Попов, В. А. Теория автоматического управления: учебное пособие / В. А. Попов. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2020. – 350 с.
10. Ivanov, O. O. Adaptive Control of Local Ventilation Systems in Mines / O. O. Ivanov, P. S. Poplavskaya // Journal of Mining Automation. – 2025. – Vol. 12, № 3. – P. 45–53.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТАРИФНОЙ ПОЛИТИКИ ПРЕДПРИЯТИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ ВОЛАТИЛЬНОСТИ ЦЕН НА ТОПЛИВО

студент **Камалова Инзиля Ильдаровна**,
науч. руководитель: канд. экон. наук, доцент
Филина Ольга Владимировна,

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В данной статье исследуются методы оптимизации тарифной политики предприятия теплоэнергетики в условиях высокой волатильности цен на топливо. Цель работы – разработка двухставочной тарифной модели, минимизирующей финансовые риски предприятия и обеспечивающей его экономическую устойчивость. С использованием методов экономико-математического моделирования рассчитана зависимость финансовых результатов предприятия от изменения затрат на топливо. Предложенная модель включает фиксированную и переменную компоненты, что позволяет балансировать интересы предприятия и потребителей.

Ключевые слова: тарифная политика, предприятие теплоэнергетики, волатильность цен, двухставочный тариф, экономическая устойчивость, финансовые риски, оптимизационная модель.

OPTIMIZATION OF THE TARIFF POLICY OF THE THERMAL POWER COMPANY IN CONDITIONS OF HIGH VOLATILITY OF FUEL PRICES

Student **Kamalova Inzilya Ildarovna**,
Academic Advisor: PhD in Economic, Associate Professor,
Filina Olga Vladimirovna,

Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. This article examines methods for optimizing the tariff policy of a thermal energy enterprise in the context of high fuel price volatility. The aim of the work is to develop a two-part tariff model that minimizes the financial risks of the enterprise and ensures its economic sustainability. Using methods of economic and mathematical modeling, the authors calculate the dependence of the enterprise's financial results on changes in fuel costs. The proposed model includes fixed and variable components, which allows balancing the interests of the enterprise and consumers.

Keywords: tariff policy, thermal energy enterprise, price volatility, two-part tariff, economic sustainability, financial risks, optimization model.

Современная экономическая работа теплоэнергетических компаний отличается высоким уровнем непредсказуемости, вызванным в основном резкими скачками цен на топливо. Геополитические и экономические события последних лет спровоцировали небывалые колебания цен на природный газ, уголь и нефть, являющиеся основными составляющими переменных расходов при производстве тепла. Это создает серьезную угрозу финансовой стабильности для энергетических компаний, работающих в системе регулируемых тарифов.

Устаревшая модель фиксированного тарифа, устанавливаемая на длительный срок, оказывается неэффективной в условиях быстро меняющегося рынка. Жесткая фиксация стоимости тепловой энергии не позволяет компаниям быстро адаптироваться к росту расходов, что в краткосрочной перспективе приводит к дефициту денежных средств, а в долгосрочной к ухудшению состояния оборудования из-за нехватки инвестиций [1].

В связи с этим, разработка и внедрение адаптивных механизмов тарифного регулирования, способных смягчать влияние внешних ценовых колебаний, является крайне важной задачей.

В настоящем исследовании для решения поставленной задачи используется экономико-математическая модель двухкомпонентного тарифа, выступающая в качестве методологической базы. Суть данной модели заключается в дифференциации общей стоимости тепловой энергии на два обособленных элемента: постоянный (мощностной) и изменяющийся (энергетический). Мощностная составляющая предназначена для компенсации неизменных издержек организации, не зависящих от объемов выпуска продукции. К таким расходам относятся затраты на техническое обслуживание и ремонт оборудования котельной и тепловых сетей, оплата труда управленческого и технического персонала, административные расходы и, что наиболее важно, возврат инвестиций, вложенных в обновление и расширение инфраструктуры. Данная часть тарифа утверждается контролирующим органом на весь период стабилизации и служит гарантией сохранения производственной мощности предприятия в рабочем состоянии вне зависимости от изменения спроса или стоимости ресурсов. Энергетическая составляющая, напротив, напрямую связана с объёмом потреблённого топлива и прочими переменными расходами. Её отличительной чертой является возможность регулярной корректировки, например, каждый квартал, на основе официальных индексов изменения цен на основной вид топлива.

С целью проверки предложенной модели был выполнен ретроспективный анализ финансовых результатов фиктивной компании, занимающейся теплоснабжением, за период с 2020 по 2024 год. В качестве основного энергоносителя был выбран газ природного происхождения. Исследование колебаний стоимости газа на краткосрочных и долгосрочных площадках продемонстрировало стандартное отклонение, равное 28 % от усредненного показателя, что доказывает предположение о значительной изменчивости цен [2].

В дальнейшем было проведено моделирование функционирования

предприятия при двух вариантах расчета: согласно существующей однокомпонентной системе и по разработанной двухкомпонентной схеме. Использовались фактические показатели объема отпуска тепловой энергии, зафиксированные тарифные ставки и фактические расходы на топливо. Результаты имитации отчетливо выявили недостатки однокомпонентного тарифа.

Во время резкого увеличения стоимости газа (более 15 % в квартал) организация начинала фиксировать убытки уже к третьему месяцу подобного ценового скачка, так как утвержденный тариф не компенсировал фактическое повышение затрат. Это обуславливало потребность в поиске дополнительных денежных средств, часто за счет заемных средств, что повышало финансовое бремя и провоцировало долговую зависимость. Применение двухкомпонентного тарифа могло бы смягчить эту отрицательную тенденцию. Фиксированная часть, занимающая примерно 40 % в общей структуре тарифа, гарантировала бы устойчивый приток денежных средств для покрытия постоянных издержек и обслуживания кредитных обязательств. Переменная же составляющая, вычисляемая исходя из действительной цены топлива, автоматически корректировалась бы при превышении определенного уровня индекса-дефлятора. Этот подход позволяет компании поддерживать прибыльность и избегать дефицита ликвидности [3].

Для пользователей, будь то частные лица или промышленные объекты, эта схема также предоставляет определенные плюсы. Во-первых, она более понятна и объективна, так как плата за тепловую энергию точнее отражает ее фактическую цену в каждый момент времени. Клиент осознает, какая доля его платежа идет на обеспечение работоспособности системы (фиксированная часть), а какая – непосредственно на потраченное топливо (переменная часть). Во-вторых, это стимулирует экономию энергии. Поскольку переменная часть тарифа напрямую связана с объемом потребления, у клиентов появляется стимул к установке приборов учета тепла и внедрению мер по снижению теплопотерь.

Для количественного обоснования преимуществ предлагаемой двухставочной модели был проведен сравнительный анализ экономических показателей при различных системах тарифообразования. Результаты расчета, представленные в таблице 1, наглядно демонстрируют влияние волатильности цен на топливо на финансовые результаты предприятия теплоэнергетики.

Ключевым моментом при использовании модели становится ее согласование с существующими правовыми нормами. В России законодательная база тарифообразования в теплоэнергетике определена Федеральным законом № 190-ФЗ и указаниями по методологии от Федеральной антимонопольной службы. Предлагаемая тарификация, основанная на двух ставках, не идет вразрез с основными принципами регулирования, а скорее углубляет их, вводя важный элемент адаптивности.

Для ее эффективного применения необходимо внести поправки в методику расчета тарифов, четко регламентирующие этапы расчета и ежеквартальной корректировки энергетической составляющей [4]. Особенно

важно выбрать беспристрастный и общедоступный индекс-дефлятор. В качестве примера можно привести индекс цен производителей на природный газ для промышленности, публикуемый Росстатом, или среднюю цену на газовой бирже. Это позволит избежать влияния субъективных факторов на процесс корректировки и сделает его понятным для всех сторон.

Таблица 1. Сравнительный анализ экономических показателей при различных моделях тарифообразования

Показатель	Ед. измер.	Одноставочный тариф	Двухставочный тариф	Отклонение
Финансовые результаты				
Месячный финансовый результат при росте цен на топливо на 40%	тыс. руб.	-9 000	+6 000	+15 000
Годовая экономия от снижения кассовых разрывов	млн руб.	-	108,0	+108,0
Экономия на стоимости заемного капитала	млн руб./год	-	10,0	+10,0
Анализ рисков				
Вероятность кассового разрыва	%	7,8	0	-7,8
Коэффициент текущей ликвидности	ед.	1,2	1,63	+0,43
Эффективность внедрения				
Затраты на внедрение системы	тыс. руб.	-	5 500	-
Срок окупаемости	дней	-	17	-
Структура тарифа				
Постоянная составляющая	руб./Гкал	-	920	-
Переменная составляющая	руб./Гкал	-	1 680	-
Общий тариф после роста цен	руб./Гкал	2 300	2 600	+300

Анализ финансовой выгоды от внедрения предложенной модели, основанный на сопоставлении финансовых показателей в различных ситуациях, выявил, что её применение сокращает риск дефицита денежных средств на

25-30 % при резких колебаниях цен, подобных тем, что наблюдались в 2022 г.

Более того, устойчивый денежный поток, гарантированный неизменной частью тарифа, улучшает кредитный рейтинг предприятия и уменьшает цену заимствований примерно на 1,5-2 %, что генерирует дополнительные ресурсы для инвестиций. По предварительным оценкам, затраты на развертывание системы мониторинга и вычисления двухкомпонентного тарифа окупятся менее чем за год, что подтверждает высокую экономическую привлекательность данного проекта [5].

В заключение, перевод на двухкомпонентную структуру тарифа является эффективным методом управления финансовыми рисками, содействующим укреплению экономической стабильности компаний теплоэнергетического сектора и обеспечивающим надежное снабжение теплом потребителей в условиях волатильности мировых энергетических рынков.

Список литературы:

1. Верстин, Н. А. Влияние теплоэнергетики на устойчивое развитие страны в современных условиях / Н. А. Верстин // Экономика и управление. – 2023. – № 5. – С. 15-25. – Текст: непосредственный.
2. Об утверждении Методических указаний по расчету тарифов в сфере теплоснабжения: Приказ ФСТ России от 13.11.2013 № 1714-э. – Текст: электронный // КонсультантПлюс. – (дата обращения: 11.11.2025).
3. Иванов, Б. А. Экономика энергетики: учебник / Б. А. Иванов. – Москва: Издательство «Энерго», 2020. – 456 с. – Текст: непосредственный.
4. Петров, П. Г. Ценовые риски в топливно-энергетическом комплексе / П. Г. Петров, М. С. Кузнецова. – Текст: электронный // Экономические стратегии. – 2024. – Том 12. – № 2. – С. 40-49. – (дата обращения: 11.11.2025).
5. Резервирование электрической нагрузки белорусской энергосистемы за счет ТЭЦ при пуске АЭС / В. А. Запасник и [и др.] // Актуальные проблемы энергетики. – 2019. – С. 32-36. – Текст: непосредственный.

© Камалова И. И., Филина О. В., 2025

ИНДУСТРИЯ 4.0 В РОССИЙСКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ: ГОТОВНОСТЬ, ИНВЕСТИЦИИ И ВЛИЯНИЕ НА УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ

студент **Ларченко Игорь Дмитриевич**,
науч. руководитель: канд. экон. наук, доцент **Гильц Надежда Евгеньевна**,
Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнёва,
г. Красноярск, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается внедрение концепции Индустрии 4.0 в российских производственных системах, анализируя готовность предприятий, объемы инвестиций и влияние цифровых технологий на управление процессами. Приводятся статистические данные и примеры успешной реализации интернета вещей (IIoT), производственных исполнительных систем (MES), систем диспетчеризации и оперативного контроля (SCADA) и цифровых двойников в различных отраслях. Особое внимание уделено повышению эффективности, сокращению простоев и оптимизации ресурсов.

Ключевые слова: индустрия 4.0, цифровизация, производственные процессы, IIoT, MES, SCADA, цифровые двойники.

INDUSTRY 4.0 IN RUSSIAN MANUFACTURING SYSTEMS: READINESS, INVESTMENTS, AND IMPACT ON PROCESS MANAGEMENT

Student **Larchenko Igor Dmitrievich**,
Academic Advisor: PhD in Economics, Associate Professor
Gilts Nadezhda Evgenyevna,
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Russian Federation

Abstract. The article examines the implementation of Industry 4.0 in Russian manufacturing systems, analyzing enterprise readiness, investment volumes, and the impact of digital technologies on process management. It presents statistical data and case studies on successful deployment of IIoT, MES, SCADA, and digital twins across various industries. The focus is on improving efficiency, reducing downtime, and optimizing resources.

Keywords: industry 4.0, digitalization, manufacturing processes, IIoT, MES, SCADA, digital twins.

За последнее десятилетие концепция Индустрии 4.0 превратилась из абстрактной модели будущего в реальный каркас модернизации производственных систем. Она опирается на сочетание киберфизических

систем, IoT, интеллектуальной обработки данных и моделей, способных описывать и предсказывать поведение сложных объектов. Переход к подобной архитектуре управления в мировой промышленности рассматривается как основной путь роста эффективности в условиях конкуренции и усложняющихся технологических цепочек [1].

Российские предприятия, несмотря на неоднородность уровня развития цифровых технологий, проходят сходный этап трансформации. Ведомственная статистика показывает, что цифровые инструменты становятся частью повседневной практики: Росстат фиксирует устойчивое увеличение числа организаций, применяющих цифровые технологии. В 2023 году такие решения использовали уже 46,2 % российских компаний [2]. Рост вовлечённости обусловлен не только технологическими трендами, но и внутренними запросами на повышение производительности труда, улучшение управляемости и снижение зависимости от внешних поставщиков оборудования и программного обеспечения.

Концепция Индустрии 4.0 базируется на сочетании нескольких ключевых теоретических и технологических принципов, обеспечивающих интеграцию информационных и производственных процессов. Центральным элементом является промышленный интернет вещей, который обеспечивает сбор и передачу данных с оборудования и производственных линий в реальном времени. Данные становятся не просто информационным ресурсом, а основой для принятия управленческих решений, предиктивного анализа и оптимизации процессов [3].

Международные организации и исследовательские центры разработали стандарты и архитектурные модели, призванные унифицировать подходы к внедрению цифровых производственных систем. Одной из наиболее известных моделей является RAMI 4.0 (Reference Architectural Model Industry 4.0), разработанная немецкой организацией ACATECH. RAMI 4.0 представляет собой трёхмерную структуру, включающую жизненный цикл продукта, иерархические уровни предприятия и слои цифровых функций. Модель позволяет системно подходить к проектированию киберфизических производственных систем, обеспечивая совместимость компонентов, модулей и программного обеспечения [3].

Кроме RAMI 4.0, на практике широко применяются принципы облачных вычислений и цифровых двойников. Цифровой двойник представляет собой виртуальную копию физического объекта, которая позволяет моделировать его поведение в различных режимах работы, прогнозировать поломки и оптимизировать технологические процессы без вмешательства в реальное оборудование [3].

Международные стандарты определяют также требования к безопасности и совместимости данных. Например, OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) обеспечивает безопасный обмен данными между различными производственными системами и позволяет интегрировать оборудование различных производителей в единую информационную сеть. Эти стандарты повышают надёжность и масштабируемость решений Индустрии 4.0

и являются ориентиром при проектировании российских систем [3].

Для России внедрение этих моделей имеет стратегическое значение. Документы Минпромторга и стратегические программы цифровой трансформации промышленности опираются на принципы RAMI 4.0 и ИИТ, адаптируя их под специфику отечественных предприятий. Российские предприятия используют эти подходы для создания единых информационных платформ, интеграции MES- и SCADA-систем, разработки цифровых двойников технологических объектов и внедрения аналитических решений на базе искусственного интеллекта [4].

Анализ отраслевых практик показывает, что использование международных стандартов позволяет ускорить цифровую трансформацию и минимизировать технологические риски. Так, интеграция киберфизических систем и унифицированных протоколов обмена данными обеспечивает не только повышение эффективности, но и снижение операционных затрат, сокращение простоев и повышение надёжности оборудования [5].

Переход к цифровым производственным системам в России обусловлен сочетанием внутренних потребностей и внешних факторов. С одной стороны, предприятия стремятся повысить устойчивость к технологическим рискам и модернизировать оборудование. С другой – ограничения на импорт способствовали активному развитию отечественных систем автоматизации, что ускорило внедрение цифровых решений.

Статистические данные подтверждают, что автоматизация и применение современных систем управления становятся нормой. В 2023 году около 42 % промышленных предприятий использовали инструменты мониторинга и анализа данных, а автоматизированные линии присутствовали примерно у трети компаний [2]. Наиболее развиты в этом отношении нефтегазовый сектор и металлургия, где уровень автоматизации достигает 60–70 % процессов [5].

Инвестиционная активность усиливается. Согласно материалам Минпромторга, ежегодные затраты российских промпредприятий на цифровизацию превышают 300 млрд рублей [4], и значительную долю в этих вложениях занимают решения ИИТ, MES, SCADA, предиктивного обслуживания и цифровых двойников. Такой рост подтверждает и CNews Analytics, отмечающая увеличение числа внедрений MES/SCADA на 12–15 % в год [5].

Однако вместе с прогрессом накапливаются и системные препятствия. Среди них дефицит квалифицированных инженеров, ограниченная доступность отечественных ПЛК и SCADA-платформ, а также разрыв между реальными потребностями цехового уровня и возможностями существующих ИТ-систем. Эти ограничения замедляют внедрение сложных решений и заставляют предприятия адаптировать цифровизацию под свои текущие ресурсы.

Развитие цифровых технологий в промышленности формирует новую логику управления производственными процессами, в которой ключевую роль начинают играть данные, сетевые взаимодействия и адаптивные модели принятия решений. Концепция Индустрии 4.0, включающая промышленный интернет вещей, киберфизические системы, цифровые двойники и

интеллектуальную аналитику, радикально меняет подход к построению автоматизированных систем управления технологическими процессами [3]. Если ранее управление ориентировалось на фиксированные алгоритмы и периодический контроль состояния оборудования, то сегодня доминируют модели, основанные на непрерывном сборе данных и динамической оптимизации параметров производственных циклов.

Переход к такой модели стал возможен благодаря росту вычислительных мощностей, снижению стоимости сенсорных модулей и развитию промышленных сетей. Практика российских предприятий показывает, что данные, поступающие от распределенных систем мониторинга, образуют основу для предиктивных алгоритмов, которые значительно повышают устойчивость и гибкость производств. Управление перестает быть реактивным и всё чаще основывается на прогнозировании и аналитической оценке будущих состояний оборудования и технологических линий.

Эти концептуальные изменения отчетливо проявляются в опыте отечественных компаний. В нефтегазовом секторе уже к 2023 году около 70 % производственных объектов крупнейших компаний были оснащены промышленными сетями интернета вещей, позволяющими фиксировать сотни параметров работы оборудования в режиме реального времени [5]. Такие решения обеспечили снижение аварийных остановок насосных станций в среднем на 18–25 %, а затраты на обслуживание сократились на 12 процентов за счет внедрения предиктивных алгоритмов диагностики. Дополнительный эффект дают цифровые двойники технологических объектов: моделирование поведения скважин и изменение режимов закачки позволило сократить подготовительные операции на 30–35 %, ускоряя принятие управленческих решений.

Похожие тенденции наблюдаются и в металлургии. Новолипецкий металлургический комбинат, модернизировав систему диагностического контроля оборудования, снизил количество внеплановых простоев доменных печей на 23 % [8]. «Северсталь» использует собственную цифровую платформу для обработки данных с более чем 6000 единиц оборудования; в результате число аварийных ремонтов уменьшилось на 10 процентов, а энергопотребление отдельных участков снизилось на 4–7 % [6]. Эти показатели подтверждают, что внедрение цифровых технологий перестало быть точечным проектом и стало системным элементом автоматизации управления.

В химической отрасли цифровые технологии оказывают значительное влияние на стабильность технологических процессов. «Сибур» применяет цифровые двойники реакционных и теплообменных установок, что позволило уменьшить вариативность технологических параметров и снизить удельные энергозатраты на пять процентов [9]. Увеличение межремонтных интервалов насосов и компрессоров на 8–12 % стало возможным благодаря использованию распределенных датчиков вибродиагностики и интеллектуальных систем анализа состояний оборудования. Для непрерывных производств химической промышленности такие результаты особенно важны, поскольку каждая непредвиденная остановка приводит к значительным экономическим потерям и

ухудшению качества продукции.

В машиностроении сочетание производственных исполнительных систем и роботизированных комплексов способствует росту производительности и снижению влияния человеческого фактора. По данным корпорации «Ростех», интеграция MES-систем с высокоточными станками с числовым программным управлением обеспечила повышение выпускаемой продукции на 10–12 %, а время переналадки сократилось почти на 17 % [10]. В сегментах высокоточного производства всё шире используются системы машинного зрения, которые уменьшают вероятность пропуска дефектов на 40 процентов, повышая качество и снижая интенсивность контрольных операций.

Даже в пищевой промышленности, где производственные линии менее капиталоемкие, внедрение современных автоматизированных систем привело к заметным улучшениям. Применение SCADA-платформ и производственных исполнительных систем способствовало сокращению уровня брака на 8–15 % и улучшению стабильности технологических режимов благодаря снижению влияния человеческого фактора [6]. Внедрение автоматизированных систем санитарного контроля позволило обеспечить более надежное соответствие отраслевым стандартам, что повысило доверие со стороны крупных торговых сетей.

Значительные изменения происходят и в электроэнергетике. Программа цифровой трансформации «Россетей» предусматривает внедрение интеллектуальных систем диагностики и анализа состояния подстанционного оборудования. Эти системы отслеживают тепловые и вибрационные параметры трансформаторов, состояние коммутационной аппаратуры и нагрузочные профили. В результате аварийные отключения снизились примерно на 15 %, а качество планирования ремонтных работ улучшилось благодаря более точным оценкам реального состояния оборудования.

Статистические данные, собранные по предприятиям различных отраслей, демонстрируют устойчивый эффект от внедрения технологий Индустрии 4.0. В среднем цифровизация позволяет сократить простои на 10–35 %, уменьшить энергопотребление на 4–10 процентов, снизить уровень брака на 8–20 % и увеличить производительность на 10–15 %. Одновременно возрастает точность планирования производственных операций, что обеспечивает сокращение издержек и повышение устойчивости работы предприятий в условиях изменчивой внешней среды.

Таким образом, можно сделать вывод, что переход к Индустрии 4.0 постепенно становится устойчивой тенденцией. Внедрение цифровых технологий влияет не только на техническую составляющую производства, но и на всю систему управления технологическими процессами. Интеграция IoT, MES, предиктивных моделей и цифровых двойников делает управление более гибким, обоснованным и прозрачным.

При этом дальнейшее продвижение в сторону цифровой зрелости требует решения нескольких ключевых задач: развития отечественной компонентной базы, подготовки кадров для работы с интеллектуальными системами и формирования единой методологической среды для цифровых проектов. Без

этого масштабное распространение Индустрии 4.0 в России будет затруднено, хотя потенциал для ускорения трансформации очевиден.

Список литературы:

1. Федеральная служба государственной статистики. Основные показатели использования цифровых технологий в организациях / ФСГС России. 2023. URL: <https://23.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/ИКТ%282%29.htm> (дата обращения: 11.11.2025).
2. Федеральная служба государственной статистики. Использование цифровых технологий организациями (2022 год) / ФСГС России. Пресс-релиз № 80 от 25.08.2023. URL: https://28.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%98%D0%9A%D0%A2_25082023.pdf (дата обращения: 11.11.2025).
3. Курюкин А. Н. Россия 2020-х гг.: Индустрия 4.0 и вопросы устойчивого развития // Social Structure, Social Institutions and Processes. – 2023. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rossiya-2020-h-gg-industriya-4-0-i-voprosy-ustoychivogo-razvitiya?ysclid=mht68gwmgo596274769> (дата обращения: 11.11.2025).
4. CNews Analytics. Российский нефтегазовый бизнес в 2023 году инвестировал в цифровую трансформацию 53 млрд руб. URL: https://www.cnews.ru/news/line/2024-10-11_rossijskij_neftegazovyj (дата обращения: 11.11.2025).
5. Elec.ru. Цифровые технологии, связь, измерения: обзор. 17.10.2022. URL: <https://www.elec.ru/publications/tsifrovye-tehnologii-svjaz-izmerenija/7457/> (дата обращения: 11.11.2025).
6. ИСИЭЗ НИУ ВШЭ. Затраты на развитие цифровой экономики в 2023 году. URL: <https://issek.hse.ru/news/984068213.html> (дата обращения: 11.11.2025).
7. ИСИЭЗ НИУ ВШЭ. Российский сектор ИКТ в 2023 году: итоги. URL: <https://issek.hse.ru/news/923161983.html> (дата обращения: 11.11.2025).
8. T Adviser. Рынок Индустрии 4.0: что это, основные проблемы. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Рынок_Индустрии_4.0 (дата обращения: 11.11.2025).
9. GM Insights. Размер и доля рынка Индустрии 4.0. URL: <https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/industry-4-0-market> (дата обращения: 11.11.2025).
10. Skolkovo Resident. Что такое промышленность 4.0 и что она даёт. URL: <https://skolkovo-resident.ru/promyshlennost-4-0/> (дата обращения: 11.11.2025).

© Ларченко И. Д., 2025

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА «ЗЕЛЕННОГО» И «ГОЛУБОГО» ВОДОРОДА ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОМПАНИИ

студент **Липовская Мария Романовна**,
науч. руководитель: канд. экон. наук, доцент
Филина Ольга Владимировна,

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В статье проводится сравнительный анализ двух ключевых технологических траекторий производства водорода в контексте глобального энергетического перехода – «зеленого» (на основе электролиза воды с использованием ВИЭ) и «голубого» (из природного газа с применением технологий CCUS). Исследование охватывает технологические аспекты, структуру затрат, влияние региональных особенностей и государственной политики на экономическую эффективность технологий. Определены ключевые факторы, влияющие на выбор стратегии энергетическими компаниями, включая ресурсную базу, существующую инфраструктуру и корпоративные цели по декарбонизации. Сделан вывод об отсутствии универсального решения и обоснована целесообразность адаптивного подхода, позволяющего гибко комбинировать технологические решения для минимизации рисков и укрепления конкурентных позиций в формирующейся водородной экономике.

Ключевые слова: водородная энергетика, «зеленый» водород, «голубой» водород, энергетический переход, декарбонизация, электролиз, CCUS (улавливание и хранение углерода), сравнительный анализ, себестоимость водорода, государственная политика, корпоративная стратегия.

COMPARATIVE ECONOMIC ANALYSIS OF GREEN AND BLUE HYDROGEN PRODUCTION TECHNOLOGIES FOR AN ENERGY COMPANY

Student **Lipovskaya Mariya Romanovna**,
Academic Advisor: PhD in Economic, Associate Professor,
Filina Olga Vladimirovna,

Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The article provides a comparative analysis of two key technological trajectories for hydrogen production in the context of the global energy transition – «green» hydrogen (produced via water electrolysis using renewable energy) and «blue» hydrogen (derived from natural gas with carbon capture, utilization, and storage - CCUS). The study covers technological aspects, cost structure, the impact of

regional specifics, and government policies on the economic efficiency of these technologies. Key factors influencing the strategic choice for energy companies are identified, including the resource base, existing infrastructure, and corporate decarbonization goals. The conclusion is drawn that there is no universal solution, and the expediency of an adaptive approach is substantiated, allowing for the flexible combination of technological solutions to minimize risks and strengthen competitive positions in the emerging hydrogen economy.

Keywords: hydrogen energy, green hydrogen, blue hydrogen, energy transition, decarbonization, electrolysis, CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage), comparative analysis, cost of hydrogen, government policy, corporate strategy.

В условиях глобального энергетического перехода водород становится стратегическим энергоносителем, определяющим конкурентоспособность энергетических компаний на десятилетия вперед. Особый интерес представляют две технологические траектории – «зеленый» водород, производимый методом электролиза воды с использованием возобновляемой энергии, и «голубой» водород, получаемый из природного газа с применением технологий улавливания и хранения углерода. Сравнительный анализ этих технологий требует комплексного подхода, учитывающего не только текущие экономические показатели, но и стратегические перспективы в формирующейся водородной экономике [1].

Современная классификация водорода отражает его углеродный след и технологические особенности производства. «Серый» водород, доминирующий в текущей структуре производства, характеризуется значительными выбросами CO₂ в процессе паровой конверсии метана. «Голубой» водород сохраняет ту же технологическую основу, но дополняется системами улавливания и хранения углерода, сокращающими выбросы примерно на 90 %. «Зеленый» водород представляет принципиально иной подход – электролиз воды с использованием исключительно возобновляемой электроэнергии, обеспечивающий нулевые выбросы CO₂ в процессе производства.

Технологическая архитектура «голубого» водорода основана на интеграции систем CCUS в традиционный процесс парового риформинга метана. Критически важным элементом становится создание инфраструктуры для транспортировки и геологического хранения, уловленного CO₂. В отличие от этого, «зеленый» водород использует разнообразные технологии электролиза: от проверенных временем щелочных систем до более гибких PEM-электролизеров и перспективных твердооксидных систем, находящихся на стадии коммерциализации. Каждая из этих технологий демонстрирует различную эффективность и адаптивность к работе с переменными возобновляемыми источниками энергии [3].

Экономическая эффективность производства водорода определяется сложным взаимодействием капитальных и операционных затрат. Для «зеленого» водорода структура себестоимости характеризуется доминированием стоимости электроэнергии (70-75 %), тогда как доля капитальных затрат на электролизер составляет 20-25 %. Географический

фактор становится определяющим – доступ к дешевой возобновляемой энергии в регионах с высокой инсоляцией или ветропотенциалом позволяет существенно снизить себестоимость производства. Капитальные затраты демонстрируют устойчивую тенденцию к снижению благодаря эффекту масштаба и технологическим усовершенствованиям [2].

Производство «голубого» водорода требует значительных капитальных вложений в системы улавливания, транспортировки и хранения углерода, увеличивающих стоимость традиционных установок парового риформинга на 50-100 %. Операционные расходы в значительной степени зависят от цен на природный газ, демонстрирующих существенную региональную вариативность. Экономика проектов существенно улучшается при наличии развитой газотранспортной инфраструктуры и подходящих геологических формаций для хранения CO₂ [4].

Анализ региональных особенностей выявляет значительные различия в конкурентоспособности технологий. Регионы с богатыми возобновляемыми ресурсами: Ближний Восток, Австралия, Чили – демонстрируют самую низкую стоимость производства «зеленого» водорода, достигающую 1,0-2,16 доллара за килограмм. Территории с доступным природным газом, такие как Саудовская Аравия и другие нефтегазодобывающие регионы, сохраняют преимущества в производстве «голубого» водорода с себестоимостью около 1,8 доллара за килограмм [5].

Государственная политика становится важнейшим фактором, влияющим на экономику водородных проектов. Налоговые льготы, субсидии, схемы ценообразования на углерод и национальные водородные стратегии создают предсказуемые условия для инвестиций. Законодательные инициативы, подобные американскому Закону о снижении инфляции, предлагают существенные налоговые льготы для проектов «зеленого» водорода, кардинально улучшая их экономические показатели.

Перспективы снижения стоимости технологий демонстрируют разнонаправленные траектории. «Зеленый» водород ожидает значительное сокращение затрат благодаря комбинированному эффекту от снижения стоимости возобновляемой энергии и технологического совершенствования электролизеров. Ожидается, что к 2030 году стоимость возобновляемой энергии достигнет 20 долларов за МВтч, а эффективность электролизеров существенно возрастет. Для «голубого» водорода основные резервы снижения затрат связаны с оптимизацией систем CCUS и развитием кластерных решений, позволяющих нескольким производствам использовать общую инфраструктуру [6].

Выбор оптимальной технологической стратегии для энергетической компании требует учета множества факторов. Ресурсная база и географическое положение определяют доступ к ключевым компонентам – возобновляемым ресурсам или месторождениям природного газа. Существующая инфраструктура – газотранспортные сети, объекты для хранения CO₂, электрические сети – создает дополнительные конкурентные преимущества для определенных технологий. Временной горизонт реализации проектов существенно различается: «голубой» водород может быть внедрен в более

сжатые сроки, в то время как «зеленый» требует больше времени на разработку, но предлагает более долгосрочные перспективы.

Корпоративная стратегия в области устойчивого развития и декарбонизации становится все более значимым фактором принятия решений. Растущие ожидания инвесторов и потребителей в отношении экологической ответственности создают дополнительный стимул для перехода к безуглеродным технологиям. При этом регуляторная среда, включая системы углеродного ценообразования и экологические стандарты, существенно влияет на сравнительную экономическую привлекательность различных технологий производства водорода.

Передовые энергетические компании все чаще принимают диверсифицированный подход, сочетающий элементы обеих технологий. Страны Ближнего Востока демонстрируют пример двухсторонней стратегии «переход к голубому водороду» и «преобладание зеленого водорода» на основе своих ресурсных особенностей. Формирование консорциумов и отраслевых партнерств позволяет компаниям объединять усилия для создания комплексных решений, охватывающих всю цепочку создания стоимости – от проектирования установок до производства и потребления водорода.

Поэтапное внедрение технологий через пилотные проекты позволяет накопить практический опыт и минимизировать риски перед переходом к крупномасштабным инвестициям. Начальные проекты могут фокусироваться на нишевых применениях водорода – заправке топливных элементов для специализированной техники или производстве низкоуглеродистой стали, с последующим масштабированием на более крупные сегменты энергетического рынка.

Сравнительный анализ показывает, что универсального решения для всех энергетических компаний не существует. «Голубой» водород предлагает преимущества быстрого внедрения и использования существующей инфраструктуры, но его долгосрочная устойчивость остается предметом дискуссий в контексте достижения нулевых выбросов. «Зеленый» водород, несмотря на текущие более высокие затраты, демонстрирует убедительную траекторию снижения стоимости и представляет единственное полностью безуглеродное решение.

Для энергетических компаний наиболее перспективным представляется адаптивный подход, позволяющий гибко сочетать технологические решения в зависимости от конкретных условий и возможностей. Такой стратегический выбор позволит не только минимизировать риски, но и занять лидирующие позиции в формирующейся водородной экономике. Ключевым фактором успеха становится способность компаний активно участвовать в создании комплексной экосистемы, включающей производство, транспортировку, хранение и потребление водорода, что в конечном итоге определит их конкурентоспособность в условиях глобального энергетического перехода.

Список литературы:

1. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности: Федеральный закон № 261-ФЗ от 23 нояб. 2009 г.: принят Государственной Думой 11 нояб. 2009 г. // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2009. – № 48. – Ст. 5711.
2. Иванов, А. А. Водородная энергетика: современное состояние и перспективы: монография / А. А. Иванов. – Санкт-Петербург: Энергоиздат, 2021. – 215 с.
3. Петрова, И. В. Сравнительный анализ технологий производства «зеленого» и «голубого» водорода / И. В. Петрова, С. М. Сидоров. – Москва: Наука, 2023. – 180 с.
4. Сидоров, В. Г. Экономика водородных проектов: оценка эффективности / В. Г. Сидоров // Альтернативная энергетика. – 2023. – № 5. – С. 25–39.
5. Ковалева, Л. М. Государственная поддержка водородной энергетики в России и за рубежом / Л. М. Ковалева // Актуальные проблемы развития топливно-энергетического комплекса: сб. науч. тр. – Москва, 2022. – С. 89–93.
6. Министерство энергетики Российской Федерации. Стратегия развития водородной энергетики в РФ: официальный сайт.

© Липовская М. Р., 2025

IMPROVING THE RELIABILITY OF MICROENERGY GRIDS USING HYBRID STORAGE SYSTEMS

Masters Student **Khanov Niyaz Tagirovich**,
Academic Advisor: PhD in Philosophy, Associate Professor
Marzoeva Irina Vladimirovna,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to improving the reliability of microenergy networks through the introduction of hybrid energy storage systems. Hybrid energy storage systems combining high-speed and capacitive storage devices are proposed as a key solution to improve the reliability of microenergy networks. They effectively compensate for the instability of renewable generation, ensuring the stabilization of network parameters and uninterrupted power supply.

Keywords: supercapacitor, battery, network, electric power industry, reliability.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ МИКРОЭНЕРГОСЕТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ

магистрант **Ханов Нияз Тагирович**,
науч. руководитель: канд. филос. наук, доцент
Марзоева Ирина Владимировна,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена повышению надёжности микроэнергосетей путём внедрения гибридных систем накопления энергии. Гибридные системы накопления энергии, комбинирующие быстродействующие и ёмкостные накопители, предлагаются как ключевое решение для повышения надёжности микроэнергосетей. Они эффективно компенсируют нестабильность возобновляемой генерации, обеспечивая стабилизацию параметров сети и бесперебойное электроснабжение.

Ключевые слова: суперконденсатор, аккумулятор, сеть, электроэнергетика, надёжность.

The modern energy sector is undergoing a fundamental transformation driven by the global trend towards decentralization and the transition to renewable energy sources (RES). Microenergynetworks, which are local, partially or completely autonomous energy systems, are becoming a key element of this new paradigm. They integrate distributed generation, primarily solar and wind, directly near consumers [2, p. 118-119]. However, their rapid development has revealed a systemic problem - the

inherent instability of renewable energy generation, which directly threatens the reliability of power supply. Notable problems faced by various objects in the implementation of renewable energy sources are voltage instability, load mismatch and monitoring, frequency fluctuations, and poor power quality [6, p. 153].

Combined energy storage systems are the most promising solution for autonomous hybrid power plants and micro-power grids. They combine in one system long-term storage systems-accumulators-and short-term storage systems-supercapacitors [3, p. 619]. This hybridization allows you to use the complementary properties of different technologies: batteries provide energy over long time intervals, and supercapacitors effectively compensate for short-term power pulses and peak loads. This allows us to achieve significant positive results: improving the reliability and energy efficiency of the power plant, reducing operating costs and reducing the cost of generated electricity, as well as increasing the service life of the entire storage system.

The key problem is that the generation of renewable energy, solar and wind energy is stochastic and unpredictable, which leads to significant fluctuations - both peaks and dips-in the supply of electricity. This situation is compounded by growing peak loads from consumers, creating a double challenge to the stability of the micro-grid. In these circumstances, traditional approaches to ensuring reliability are often insufficient or economically inefficient.

The operation of a hybrid power storage system is based on a rational distribution of functions between components with different characteristics. The high-power and high-speed supercapacitor module acts as a buffer element to compensate for short-term load surges. It instantly releases energy when there is a power shortage (caused, for example, by a sharp increase in consumption or a drop in generation) and, conversely, accumulates it with short-term surpluses. This allows you to effectively smooth out high-frequency voltage fluctuations in the network. To compensate for long-term and stable voltage deviations, a rechargeable battery is used, which acts as the main source of energy with a high storage density. Thus, the hybrid system integrates the key advantages of both types of storage devices.: high specific power and response rate of supercapacitors with high energy consumption and the ability to long-term discharge of batteries [5, p. 308 - 309].

Attempts to ensure the reliability of micro-power grids using single-type storage devices demonstrate fundamental technological limitations. Lithium-ion batteries, with their high power and fast response, are ideal for rapid regulation. However, their use for long-term energy storage leads to accelerated destruction and a significant increase in cost due to a limited cyclic resource. In addition, Lithium reserves are limited in the world [5, p. 306].

In turn, flow batteries are characterized by high capacity and durability, but are not able to provide instant compensation for fluctuations due to low specific power and slow response.

Thus, none of the technologies alone can effectively simultaneously solve the problems of both short-term stabilization (milliseconds-minutes) and long-term generation equalization (hours-days). This is a systemic contradiction and creates prerequisites for the introduction of hybrid systems that combine the advantages of

different types of drives.

Mechanisms for improving reliability with hybrid systems

The key advantage of hybrid systems is the synergistic effect achieved through a rational distribution of tasks between components.

Frequency and voltage stabilization is provided by high-speed components (such as lithium-ion batteries or supercapacitors), which instantly compensate for short-term surges, maintaining the quality of electricity. The supercapacitor is based on two porous electrodes separated by a separator and immersed in an electrolyte [4, p. 115 - 117]. A key role is assigned to the electrodes, which are made from highly porous carbon materials, such as activated carbon, graphene or nanotubes. These materials provide a huge surface area for charge storage.

The electrolyte can be water, which provides high power, or organic, which allows you to achieve a higher operating voltage and, consequently, higher energy.

Energy storage occurs through two processes:

1) Accumulation in the double electric layer: Ions from the electrolyte are electrostatically adsorbed on the surface of the electrodes, creating a charge, as in a classical capacitor.

2) Pseudo-capacity: Additional capacity is provided by fast and reversible chemical reactions (redox) between ions and the electrode material.

The combination of these mechanisms allows supercapacitors to quickly accumulate and release significant charge [3, p. 620].

Generation and consumption peaks are smoothed by capacitive components (such as flow batteries). They accumulate excess energy during periods of excess and provide long-term returns during times of scarcity.

Providing backup power is made possible by combining power and capacity. The hybrid system is able to replace the main generation when it fails, ensuring uninterrupted supply for a given time.

Reducing equipment wear is achieved through intelligent control, which distributes the load in an optimal way. Short-term high-power loads are taken over by high – speed components, and long-term loads are taken over by capacitive components, which significantly increases the overall service life of the system.

One of the most effective options is a combination of lithium-ion batteries with supercapacitors, where the former provides medium-term energy storage, and the latter-instant response to load surges and stabilization of network parameters. Also promising are systems that combine lithium-ion and lead-acid batteries, which allows optimizing capital expenditures and providing reliable backup power [1, p. 188]. Hybrids based on lithium-ion batteries and superconducting systems are used for tasks that require maximum efficiency and response speed, demonstrating efficiency of up to 98% and capable of compensating for powerful peak loads. The most versatile solution is three-level systems in which supercapacitors are responsible for millisecond fluctuations, lithium-ion batteries – for smoothing minute and hour differences, and lead-acid batteries provide a long reserve. Such hybrid configurations are used in industrial power systems, microgrids of remote settlements and critical infrastructure facilities, ensuring reliable and efficient power supply.

Thus, the integration of hybrid energy storage systems that combine high-speed

supercapacitors and energy-intensive batteries demonstrates significant potential for solving key reliability problems of micro-grids with renewable energy sources. This combination allows efficient load distribution: supercapacitors compensate for short-term high-frequency fluctuations, ensuring the stability of network parameters, while batteries cover long-term imbalances between generation and consumption. This functional symbiosis not only promotes uninterrupted power supply and improves the quality of electricity, but also helps extend the service life of the storage devices themselves by reducing the dynamic loads on the batteries. Consequently, the use of hybrid energy storage systems appears to be a practical tool for solving fundamental problems related to the stochasticity of renewable energy sources, creating conditions for the sustainable development of decentralized energy, which determines the relevance of further research in the field of optimizing the architecture and control algorithms of such complexes.

Список литературы:

1. Каканова, Е. Ю. Солнечная и ветровая энергетика: аккумулирование энергии / Е. Ю. Каканова // БУДУЩЕЕ НАУКИ – 2025 : сборник научных статей 12-й Международной молодежной научной конференции. – Курск, 2025. – Т. 5. – С. 185–190.
2. Сошинов, А. Г. Перспективы применения современных гибридных накопителей электроэнергии в альтернативной энергетике / А. Г. Сошинов, Т. В. Копейкина, В. С. Жиркова // Сборник научных трудов. – 2024. – С. 118–122.
3. Червяков, Д. Ю. Перспективы применения комбинированных накопителей энергии в автономных гибридных энергетических установках с возобновляемыми источниками энергии / Д. Ю. Червяков, А. Г. Сошинов // Сборник научных трудов. – 2022. – С. 617–620.
4. Алероев, М. А. Перспективы использования суперконденсаторов в системах накопления энергии / М. А. Алероев, Ю. Ю. Вассунова // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2024. – Т. 9, № 11. – С. 112–118.
5. Червяков, Д. Ю. Перспективы использования гибридных накопителей энергии в автономных комбинированных энергетических установках на возобновляемых источниках энергии / Д. Ю. Червяков // Приборостроение, электрооборудование и системы управления. – 2021. – № 1. – С. 305–309.
6. Усачева, И. В. Микросети для локального энергоснабжения децентрализованных потребителей: обзор международного опыта / И. В. Усачева, Л. В. Пономарева, В. В. Антоненко // Научные труды Вольного экономического общества России. – 2021. – Т. 229, № 3. – С. 167–184.

© Ханов Н. Т., 2025

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАЛЫХ МОДУЛЬНЫХ РЕАКТОРОВ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ТЕПЛА И ВОДОРОДА В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ РЕГИОНОВ С НЕУСТОЙЧИВОЙ НАГРУЗКОЙ

студент **Чистяков Александр Васильевич**,
старший преподаватель **Бускин Руслан Владимирович**,
Казанский государственный энергетический университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В работе исследуется применение малых модульных реакторов (ММР) в энергосистемах регионов с неустойчивой нагрузкой. Предложена укрупнённая модель распределения мощности ММР между выработкой электроэнергии, теплоснабжением и производством водорода. Сравниваются сценарии без ММР, с ММР в электрическом и комбинированном режимах. Показано, что комбинированное использование ММР снижает топливные затраты, уменьшает выбросы и повышает использование установленной мощности.

Ключевые слова: малая модульная атомная станция, атомные станции малой мощности, комбинированная выработка, водород, теплоснабжение, энергобаланс региона, неустойчивая нагрузка.

EFFECTIVENESS OF USING SMALL MODULAR REACTORS FOR COMBINED PRODUCTION OF ELECTRICITY, HEAT, AND HYDROGEN IN ENERGY SYSTEMS OF REGIONS WITH UNSTABLE LOADS

Student **Chistyakov Alexander Vasilyevich**,
Senior Lecturer **Buskin Ruslan Vladimirovich**,
Kazan State Power Engineering University
Kazan, Russian Federation

Abstract. The study examines the use of small modular reactors (SMRs) in the power systems of regions with unstable demand. An aggregated model is proposed to distribute SMR output among electricity generation, district heating, and hydrogen production. Three scenarios are compared: without SMRs, with SMRs in electricity-only mode, and with SMRs in combined mode. Results show that combined SMR operation reduces fuel consumption, lowers emissions, and increases capacity utilization.

Keywords: small modular reactor, low-power nuclear plants, cogeneration, hydrogen, district heating, regional energy balance, fluctuating load.

Современный энергопереход сопровождается одновременно несколькими тенденциями: ужесточением требований к ограничению выбросов парниковых газов, ростом спроса на надёжное энергоснабжение и необходимостью сдерживать увеличение конечной стоимости энергии для промышленности и населения. В этих условиях особую актуальность приобретают концепции, сочетающие преимущества низкоуглеродных источников с возможностью гибкого формирования топливно-энергетического баланса. Одним из таких направлений является атомно-водородная энергетика, предполагающая использование ядерных источников не только для выработки электроэнергии и тепла, но и для получения водорода как энергоносителя, аккумулирующего избыточную энергию и выступающего сырьём для химической промышленности и транспорта [1].

На фоне развития атомно-водородной энергетики усиливается интерес к малым модульным реакторам и атомным станциям малой мощности. Эти установки изначально проектируются как тиражируемые, с поэтапным вводом модулей, возможностью размещения ближе к центрам потребления и потенциально более высокой степенью адаптации к особенностям конкретной энергосистемы. В отечественной литературе подчёркивается, что ММР могут использоваться как для замещения выбывающих тепловых мощностей, так и для энергоснабжения удалённых или изолированных районов, где строительство крупной АЭС экономически или технически затруднено [2].

Энергопотребление многих российских регионов характеризуется сложной структурой. Суточные графики электрической нагрузки имеют выраженные пики в утренние и вечерние часы, а сезонные колебания дополнительно усиливаются необходимостью централизованного теплоснабжения в продолжительный отопительный период. Значительная часть генерирующих мощностей представлена устаревшими тепловыми электростанциями, работающими на природном газе, угле или дизельном топливе. Протяжённые электрические и тепловые сети приводят к высоким потерям и ограничивают возможности маневрирования мощностью. Проведённые исследования локальных энергосистем восточных регионов России показывают, что включение атомных станций малой мощности позволяет повысить надёжность энергоснабжения и снизить зависимость от завозимого топлива, особенно в условиях дефицита развитой сетевой инфраструктуры [3].

В предлагаемой постановке задачи ММР рассматривается в качестве многофункционального источника энергии, способный в зависимости от текущих условий перераспределять свою мощность между тремя основными направлениями: покрытие электрической нагрузки региона, обеспечение тепловой нагрузки (отопление, горячее водоснабжение, технологическое тепло) и питание электролизёров для производства водорода. Такое использование ядерного источника естественно продолжает логику проектов, в которых внепиковая электроэнергия АЭС применяется для выработки водорода с

последующей продажей или использованием на месте, что рассматривается как один из способов повышения экономической эффективности атомной генерации [4].

Укрупнённый подход к моделированию предполагает построение годового или многолетнего энергобаланса региона с дискретизацией по времени, что позволяет учесть суточные и сезонные колебания спроса. На вход модели подаются: почасовые (или с иным шагом) профили электрической и тепловой нагрузки; характеристики существующих генерирующих мощностей (тепловые электростанции, возможные возобновляемые источники, котельные, системы централизованного теплоснабжения); параметры проектируемых ММР (установленная электрическая и тепловая мощность, допустимые режимы перераспределения энергии, ограничения по минимальной и максимальной нагрузке); а также технико-экономические параметры внешней среды, включающие цены на топливо, тарифы на электрическую и тепловую энергию, ориентировочную цену водорода и возможные платежи за выбросы парниковых газов.

Особое внимание уделяется описанию связки «ММР – электролизёры». Предполагается, что производительность электролизёров может варьироваться в заданном диапазоне, что позволяет использовать их в качестве управляемой нагрузки, сглаживающей колебания генерации и спроса. В периоды низкой электрической нагрузки избыточная мощность ММР направляется на электролиз воды, а полученный водород может аккумулироваться и потребляться в другие периоды либо поставляться внешним потребителям. При этом в модели учитывается энергетический КПД электролиза, а также возможные ограничения по мощности и длительности работы электролизёрных установок.

Для оценки роли ММР рассматриваются три сценария. В первом, базовом, энергосистема региона функционирует без атомной генерации: электрическая и тепловая нагрузка покрывается тепловыми электростанциями, газотурбинными и газопоршневыми установками, котельными и, при необходимости, возобновляемыми источниками. Водород в этом сценарии либо не производится, либо относится к внешнему сегменту и в энергобалансе региона не учитывается. Во втором сценарии в систему вводится малая модульная атомная станция, которая работает только в электрическом режиме и направляет всю вырабатываемую электроэнергию в сеть. Это позволяет снизить долю тепловой генерации, уменьшить потребление ископаемого топлива и сократить выбросы парниковых газов, однако тепловой потенциал установки и возможность получения водорода остаются неиспользованными. В третьем сценарии ММР работает в комбинированном режиме: часть электрической мощности идёт на покрытие базовой нагрузки, часть тепловой мощности используется для нужд теплоснабжения, а избыточная электрическая мощность в непиковые часы направляется на электролизеры.

Сравнение сценариев проводится по ряду интегральных показателей. К

ним относятся: суммарные приведённые затраты на энергоснабжение региона за расчётный период; структура этих затрат по компонентам (топливо, эксплуатация и ремонт, капитальные вложения, углеродные платежи); удельные выбросы парниковых газов на единицу полезной энергии; коэффициенты использования установленной мощности различных типов генерации; доля покрываемой атомной генерацией нагрузки; объёмы производимого водорода и доля выручки от его реализации в общем денежном потоке энергосистемы. Дополнительно оцениваются показатели надёжности и устойчивости: резервируемость мощности, наличие «узких мест» в структуре генерации, чувствительность системы к внешним шокам, таким как резкий рост цен на газ или введение новых норм углеродного регулирования.

В базовом сценарии, как правило, основную долю приведённых затрат формируют топливные расходы тепловых электростанций. При невысоких ценах на топливо такая структура может быть экономически приемлемой, однако при росте цен на газ или уголь, а также при введении значимых углеродных платежей расходы энергосистемы существенно увеличиваются. Удельные выбросы парниковых газов остаются максимальными, а зависимость от импортируемого или завозимого топлива повышает уязвимость региона к внешней конъюнктуре.

Во втором сценарии введение ММР, работающего только в электрическом режиме, приводит к сокращению доли тепловой генерации и, как следствие, к уменьшению выбросов диоксида углерода и других загрязняющих веществ. При этом сохраняется жёсткая привязка экономического результата проекта к рынку электроэнергии: выручка формируется преимущественно за счёт продажи электрической энергии, а тепловой и водородный потенциал отсутствуют. Коэффициент использования установленной мощности ММР может быть ограничен структурой спроса: в периоды очень низкой нагрузки часть мощности остаётся неостребованной, если не предусмотрены дополнительные направления потребления.

Наиболее перспективные результаты демонстрирует третий, комбинированный, сценарий. Здесь ММР включается в энергосистему одновременно как источник базовой электрической мощности, как элемент системы теплоснабжения и как поставщик энергии для производства водорода. Зимой и в межсезонье значительная доля теплового потенциала реактора используется для централизованного теплоснабжения, что позволяет снизить нагрузку котельных и части тепловых электростанций. В непиковые часы электрической нагрузки высвобождающаяся мощность направляется на электролизёры, что увеличивает общий выпуск продукции за счёт водорода и делает нагрузку ММР более равномерной в течение года.

Системный эффект от реализации данного сценария проявляется в нескольких аспектах. Во-первых, уменьшается суммарный расход органического топлива, поскольку часть тепловой и электрической нагрузки переносится с газовых или угольных станций на ММР. Это приводит к

снижению удельных выбросов парниковых газов по энергосистеме в целом. Во-вторых, возрастает коэффициент использования установленной мощности ММР: сочетание электрической, тепловой и водородной продукции способствует более полному использованию потенциальной энергии ядерного топлива. В-третьих, за счёт появления сегмента водорода формируется дополнительный денежный поток, частично независимый от регионального рынка электрической энергии и создающий новые возможности для интеграции промышленности, транспорта и энергетики.

Для более глубокой оценки проводится параметрический анализ, в котором варьируются ключевые экономические и технологические параметры: цена природного газа, уровень углеродных платежей, ориентировочная цена водорода на внутреннем и внешнем рынках, структура электрической и тепловой нагрузки, доля экспортно ориентированных потребителей. Такие расчёты позволяют выделить диапазоны условий, при которых комбинированный сценарий с ММР оказывается более привлекательным, чем традиционная тепловая генерация или ММР, работающий только в электрическом режиме. В частности, при росте цен на органическое топливо и появлении значимых экономических стимулов к сокращению выбросов (углеродный налог, системы торговли квотами) преимущество комбинированной атомно-водородной схемы становится более выраженным.

Следует отметить, что предложенная модель имеет ряд ограничений. Она не учитывает подробно сетевые ограничения и режимную работу электрических и тепловых сетей, описывая потери и ограничения на уровне агрегированных коэффициентов. Динамика пусков и остановов тепловых мощностей моделируется в упрощённом виде, без детального анализа влияния на ресурс оборудования. Не рассматриваются также вопросы интеграции водородной инфраструктуры: варианты транспорта, хранения и конечного использования водорода, требования к безопасности и нормативному регулированию. Эти аспекты требуют отдельного анализа с опорой на результаты фундаментальных и прикладных исследований в области водородной энергетики и технологии [5].

Несмотря на указанные ограничения, укрупнённый подход к моделированию энергобаланса позволяет получить качественные выводы о роли малых модульных реакторов в энергосистемах регионов с неустойчивой нагрузкой. Проведенное исследование показывает, что ММР, работающие в комбинированном режиме и интегрированные с производством водорода, могут стать одним из ключевых элементов формирования устойчивых низкоуглеродных энергосистем. Дальнейшее развитие исследований может включать детализацию сетевой модели, учёт конкретных проектов ММР и водородной инфраструктуры, а также интеграцию технико-экономического анализа с оценкой социально-экономических эффектов для региона.

Список литературы:

1. Пономарёв-Степной, Н. Н. Атомно-водородная энергетика / Н. Н. Пономарёв-Степной // Атомная энергия. – 2004. – Т. 96, вып. 6. – С. 411–425. – Текст: непосредственный.
2. Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики: в 2 т. Т. 2 / под ред. акад. РАН А. А. Саркисова. – М.: Академ-Принт, 2015. – 387 с. – Текст: непосредственный.
3. Воропай, Н. И. Сравнительная эффективность использования атомных станций малой мощности в локальных энергосистемах на востоке России / Н. И. Воропай, Б. Г. Санеев, И. Ю. Иванова, А. К. Ижбулдин // Прогнозирование развития мировой и российской энергетики: подходы, проблемы, решения: сб. науч. тр. Седьмых Мелентьевских чтений / под ред. акад. РАН А. А. Макарова. – М.: ИНЭИ РАН, 2013. – С. 196–205. – Текст: непосредственный.
4. Аминов, Р. З. Оценка эффективности получения водорода на базе внепиковой электроэнергии АЭС / Р. З. Аминов, А. Н. Байрамов // Альтернативная энергетика и экология. – 2016. – № 5–6. – С. 59–70. – Текст: непосредственный.
5. Шпильрайн, Э. Э. Введение в водородную энергетику / Э. Э. Шпильрайн, С. П. Малышенко, Г. Г. Кулешов; под ред. В. А. Легасова. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 264 с. – Текст: непосредственный.

© Чистяков А. В., Бускин Р. В., 2025

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС НА НАДЕЖНОСТЬ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА АТОМНОЙ СТАНЦИИ

студент **Чистяков Александр Васильевич**,
старший преподаватель **Бускин Руслан Владимирович**,
Казанский государственный энергетический университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Рассматривается влияние применения аддитивных технологий при изготовлении элементов оборудования атомных станций на показатели надёжности и экономики жизненного цикла. Анализируются особенности металлической 3D-печати, её влияние на структуру материала, ремонтпригодность и длительность простоев. Показано, что при соблюдении требований лицензирующих органов аддитивное производство способно снизить совокупные затраты за счёт сокращения сроков изготовления и модернизации оборудования.

Ключевые слова: аддитивные технологии, атомная станция, жизненный цикл, надёжность оборудования, ремонтпригодность.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF ADDITIVE MANUFACTURING OF NPP EQUIPMENT COMPONENTS ON RELIABILITY AND LIFE- CYCLE ECONOMICS

Student **Chistyakov Alexander Vasilyevich**,
Senior Lecturer **Buskin Ruslan Vladimirovich**,
Kazan State Power Engineering University
Kazan, Russian Federation

Abstract. The paper analyzes the impact of additive manufacturing of nuclear power plant equipment components on reliability and life-cycle economics. The technological features of metal 3D printing and their influence on material structure, maintainability, downtime and modernization potential are discussed. It is shown that, subject to regulatory approval, additive manufacturing can reduce total life-cycle costs by shortening production lead time and enabling on-demand fabrication of critical spare parts.

Keywords: additive manufacturing, nuclear power plant, life-cycle cost, reliability, maintainability.

Развитие атомной энергетики настоятельно требует не только повышения конкурентоспособности атомных станций, но и безусловного соблюдения жёстких требований к надёжности и безопасности оборудования на всех этапах

его жизненного цикла. Значительная доля совокупных затрат приходится на изготовление, модернизацию и ремонт оборудования реакторного отделения, систем безопасности и вспомогательных систем. В связи с этим закономерный интерес атомной отрасли вызывают технологии, которые обеспечивают комплексное управление структурой материала, геометрией деталей и логистикой поставок. Одним из таких направлений выступают аддитивные технологии изготовления металлических изделий, дающие возможность формировать детали сложной формы при послойном наращивании материала.

Аддитивное производство принципиально отличается от традиционных методов обработки давлением и резанием: материал не удаляется из заготовки, а последовательно добавляется слоями по заданной трёхмерной модели. Для металлов наибольшее значение имеют селективное лазерное сплавление порошков, электронно-лучевая и дуговая наплавка, а также технологии проволоочной наплавки с использованием металлических и металлпорошковых проволок. Такие процессы позволяют реализовывать внутренние каналы сложной конфигурации, интегрировать в одну деталь функции, ранее выполнявшиеся несколькими узлами, и тем самым уменьшать количество сборочных операций и сварных соединений, которые традиционно рассматриваются как потенциальные зоны отказов [1].

Ключевое преимущество аддитивных технологий для надёжности оборудования АЭС заключается в целенаправленной оптимизации формы и внутренней структуры детали в соответствии с действующими нагрузками и тепловыми режимами. Топологическая оптимизация позволяет перераспределять материал в зонах максимальных напряжений, а внутрикорпусные каналы сложной формы – формировать более равномерные температурные поля, снижая термические напряжения. Кроме того, послойный принцип построения деталей позволяет сократить количество разнородных контактных поверхностей и минимизировать длину сварных швов. В совокупности это потенциально ведёт к снижению вероятности развития усталостных трещин и коррозионных повреждений, что особенно важно для насосного оборудования, теплообменников и элементов арматуры, работающих в условиях циклических нагрузок и агрессивных сред.

Экономический эффект от внедрения 3D-печати проявляется на протяжении всего жизненного цикла оборудования – от стадии изготовления до этапа эксплуатации. Для традиционного производства характерны длительные сроки проектирования и изготовления технологической оснастки, значительные транспортные плечи при поставке запасных частей и необходимость поддерживать расширенный складской запас. В аддитивном варианте проект детали напрямую связан с цифровой моделью, а сама деталь может изготавливаться непосредственно вблизи площадки эксплуатации либо в сети специализированных центров. Это снижает время простоя оборудования при отказе, уменьшает объём замороженных в запасных частях средств и позволяет быстрее внедрять конструктивные изменения по результатам эксплуатации [2].

Вместе с тем, для атомной энергетики критически важным остаётся вопрос гарантированного качества и предсказуемости свойств получаемого материала.

Послойное формирование из порошков и проволоки сопровождается риском образования пор, непроваров и внутренних дефектов, а также выраженной анизотропией механических характеристик. В ответ на эти вызовы развиваются технологические решения, направленные на повышение однородности структуры и снижение дефектности. Так, исследования российских учёных Пермского политеха и Уральского федерального университета показали, что использование металлпорошковых проволок вместо стандартных сварочных позволяет получать бездефектные заготовки с повышенными прочностью и пластичностью, при этом предел текучести наплавленного материала превосходит показатели традиционно используемых коррозионностойких сталей, а производительность наплавки возрастает на 10–30 % [3]. Для атомной отрасли подобные технологические усовершенствования открывают путь к формированию доказательной базы, необходимой для сертификации и внедрения аддитивных деталей в высоконагруженные узлы оборудования.

Существенное влияние аддитивных технологий проявляется и на структуру затрат жизненного цикла. При проектировании новой станции возможность заменить часть корпусных или опорных элементов на аддитивные даёт потенциал уменьшения металлоёмкости конструкций и сокращения трудоёмкости механообработки. На стадии эксплуатации дополнительный экономический эффект связан с сокращением длительности плановых и внеплановых ремонтов за счёт быстрой печати уникальных запасных частей, ранее требовавших долгих согласований и изготовления единичными партиями. Для оборудования с длительным сроком службы это приводит к перераспределению затрат: доля капитальных вложений, приходящихся на изготовление сложной оснастки и запасных частей, снижается, а доля затрат на обеспечение цифровой инфраструктуры (управление данными, стандартизация моделей) возрастает, но остаётся ниже совокупных расходов традиционной схемы при сопоставимом уровне надёжности.

Развитие аддитивных технологий в атомной отрасли ведётся целенаправленно и системно. Создание специализированной компании «Русатом – Аддитивные технологии» в структуре Топливной компании ТВЭЛ придало процессу отраслевой статус: единый интегратор отвечает за разработку линейки промышленных 3D-принтеров, производство металлических порошков, программного обеспечения и оказание услуг по 3D-печати для высокотехнологичных отраслей, включая ядерный комплекс. В официальных сообщениях подчёркивается, что внедрение аддитивных технологий рассматривается как инструмент снижения себестоимости строительства атомных станций и их оборудования при одновременном сохранении требуемого уровня безопасности [4].

Практическая интеграция аддитивных деталей в оборудование АЭС осуществляется поэтапно с учётом классов безопасности. Представители компании-интегратора отмечают, что разрабатывается классификация применимости 3D-изделий в зависимости от их близости к активной зоне и значимости для безопасности; в первую очередь рассматриваются компоненты вспомогательных систем, относящиеся к наиболее удалённому четвёртому

контуру. Уже сегодня в тестовом режиме печатаются корпуса насосов, валовые элементы и выгородки реакторов, проходящие полный цикл испытаний, а в ближайшей перспективе ожидается получение разрешений на использование аддитивных деталей в составе вспомогательного оборудования атомных станций [5]. Такой подход минимизирует риск для надёжности систем безопасности при одновременном накоплении статистики эксплуатации.

Анализируя влияние аддитивных технологий на надёжность оборудования АЭС, следует признать наличие как несомненных преимуществ, так и новых источников неопределённости. К позитивным факторам относятся: возможность снизить количество сварных соединений и разъёмных стыков; формирование оптимизированной геометрии с учётом реальных напряжённо-деформированных состояний; повышение ресурса за счёт улучшения локальной теплоотдачи и снижения концентрации напряжений. В то же время для аддитивных деталей необходимы дополнительные процедуры квалификации технологий, верификации цифровых моделей, контроля стабильности порошковых материалов и мониторинга процесса построения, включая внедрение встроенных систем неразрушающего контроля. До тех пор, пока эти процедуры не пройдут полную стандартизацию и не получат подтверждение в ходе длительной эксплуатационной практики, применение аддитивных деталей в наиболее ответственных узлах реакторной установки будет оставаться в рамках пилотных проектов.

Экономическая оценка жизненного цикла атомной станции с учётом аддитивного производства должна включать не только капитальные затраты на приобретение оборудования и создание центров 3D-печати, но и снижение стоимости простоев при ремонтах, уменьшение складских запасов, сокращение сроков модернизации и повышение гибкости управления номенклатурой деталей. В ряде случаев целесообразной оказывается не полная замена традиционных технологий, а их комбинирование: аддитивные процессы используются для изготовления заготовок сложной формы, а окончательная обработка выполняется традиционными методами. Такое сочетание позволяет учесть требования консервативной отраслевой нормативной базы и одновременно реализовать преимущества новой технологии.

Таким образом, можно констатировать, что аддитивные технологии изготовления элементов оборудования АЭС уже вносят заметный вклад в экономику жизненного цикла станций и закладывают фундамент для будущего повышения их надёжности. На этапе внедрения наибольший эффект достигается в зонах с умеренной ответственностью, где ускорение ремонта и снижение логистических затрат особенно значимы, а риск для безопасности минимален. По мере развития методов проектирования, контроля качества и лицензирования можно ожидать расширения области применения аддитивных деталей, включая элементы, непосредственно влияющие на ресурс ключевого оборудования. В этих условиях стратегической задачей атомной отрасли становится формирование согласованной методологии оценки надёжности аддитивных деталей и интеграция этой методологии в систему управления жизненным циклом атомной станции.

Список литературы:

1. Канищев, М. В. Введение в аддитивные технологии. Т. 1. Обзор основных технологий 3D-печати: учебник / М. В. Канищев, Л. М. Ульев. – Москва: Издательский дом МИСиС, 2023. – 352 с. – Текст: непосредственный.
2. Толочко, Н. К. Аддитивные технологии в производстве и ремонте машин: учебное пособие / Н. К. Толочко [и др.]. – Нур-Султан: КАТУ им. С. Сейфуллина, 2022. – 184 с. – Текст: непосредственный.
3. Металл без дефектов. Российские ученые улучшили технологию 3D-печати [Электронный ресурс] // Поиск: новости науки и техники. – 18.11.2024. – Режим доступа: <https://poisknews.ru/additivnye-tehnologii/metall-bez-defektov-rossijskie-uchenye-uluchshili-tehnologiyu-3d-pechati/> (дата обращения: 18.11.2025).
4. Росатом создает компанию по развитию аддитивных технологий в атомной отрасли [Электронный ресурс] // Редкие земли. – 13.02.2018. – Режим доступа: <https://rareearth.ru/ru/news/20180213/03726.html> (дата обращения: 22.11.2025).
5. Росатом рассчитывает начать 3D-печать деталей для атомных станций через год [Электронный ресурс] // ТАСС. – 14.11.2023. – Режим доступа: <https://tass.ru/ekonomika/19279939> (дата обращения: 23.11.2025).

© Чистяков А. В., Бускин Р. В., 2025

ВЛИЯНИЕ ОБЩЕСТВЕННОГО ВОСПРИЯТИЯ РИСКА НА ВЫБОР ПЛОЩАДОК И СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ГЕНЕРАЦИИ В УСЛОВИЯХ ЭНЕРГОПЕРЕХОДА

студент **Чистяков Александр Васильевич**,
старший преподаватель **Бускин Руслан Владимирович**,
Казанский государственный энергетический университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В статье анализируется влияние общественного восприятия риска атомной энергетики на выбор площадок размещения и сценариев развития атомной генерации в России в условиях энергоперехода. Используются данные репрезентативных опросов населения 2019–2025 гг. по стране и в регионах присутствия АЭС. Показано, как неоднородность восприятия риска и доверия к отрасли определяет требования к коммуникационным стратегиям и механизмам согласования проектов.

Ключевые слова: атомная энергетика, энергопереход, общественное восприятие риска, социальная приемлемость, выбор площадки, общественное мнение.

IMPACT OF PUBLIC RISK PERCEPTION ON NPP SITING AND NUCLEAR GENERATION SCENARIOS IN THE CONTEXT OF ENERGY TRANSITION

Student **Chistyakov Alexander Vasilyevich**,
Senior Lecturer **Buskin Ruslan Vladimirovich**,
Kazan State Power Engineering University
Kazan, Russian Federation

Abstract. The paper examines how public risk perception of nuclear energy affects power plant siting and nuclear generation development scenarios in Russia under the energy transition. It draws on nationwide and regional opinion polls conducted in 2019–2025, including regions hosting nuclear facilities. The study shows how spatial differences in perceived risk and institutional trust shape requirements for communication strategies and decision-making procedures for new nuclear projects.

Keywords: nuclear power, energy transition, public risk perception, social acceptability, site selection, public opinion.

В контексте глобального энергоперехода атомная энергетика представляет собой один из немногих низкоуглеродных источников, способных обеспечивать базовую нагрузку и стабильность энергосистемы в условиях роста доли переменных возобновляемых источников. На стратегическом уровне

Россия декларирует сохранение и расширение доли атомной генерации, опираясь на технологические преимущества и экспортный потенциал отрасли. Однако масштаб и темпы развития атомной энергетики в значительной степени определяются не только техническими и экономическими факторами, но и общественным восприятием риска, которое влияет на выбор площадок, социальную приемлемость проектов и политические решения.

По данным независимого социологического исследования АНО «Левада-Центр», приведённым в годовом отчёте АО «Атомэнергпром» за 2018 год, уже к 2019 году доля сторонников использования атомной энергии в России достигла 74,5 % от числа опрошенных. При этом 48,2 % респондентов выступали за активное развитие атомной энергетики, 26,3 % – за сохранение её на нынешнем уровне, тогда как суммарная доля сторонников свертывания или отказа от атомной энергетики составляла около 17,5 % [1]. Приведённые данные свидетельствуют, что базовая структура общественного мнения к концу 2010-х годов характеризовалась устойчивым преобладанием сторонников развития атомной энергетики при наличии заметной, но менее многочисленной группы критиков.

Дальнейшая динамика общественного восприятия демонстрирует укрепление позитивного отношения к атомной энергетике. Согласно годовому отчёту АО «Атомэнергпром» за 2021 год, основанному на результатах социологического исследования АНО «Левада-Центр», доля сторонников использования атомной энергии в России по итогам 2021 года составила 77,4 %, тогда как в 2020 году этот показатель равнялся 75,2 % [2]. Таким образом, за короткий период зафиксирован прирост поддержки на несколько процентных пунктов при сохранении высокого уровня общественного согласия с необходимостью сохранения или развития атомной генерации. Важно, что в структуре ответов растёт именно доля сторонников активного развития, а не только сохранения статус-кво, что является ключевым фактором для реализации сценариев наращивания мощностей.

Более детальное представление о факторах доверия и восприятия риска дают результаты двух волн репрезентативных опросов населения, проведённых в 2023–2024 годах и направленных на анализ отношения к российской атомной отрасли и Государственной корпорации «Росатом». Исследование, опубликованное в виде статьи «Атомная отрасль в восприятии россиян: доверие и его факторы» на портале РАНХиГС, показывает, что к началу 2020-х годов доминирующей установкой является воспринимаемая технологическая надёжность и экологическая приемлемость современных АЭС, при этом уровень доверия к отраслевым институтам выступает ключевым детерминантом снижения субъективного риска [3]. Авторы подчёркивают, что сочетание высокой информированности о роли атомной энергетики в декарбонизации и устойчиво положительного образа отрасли создаёт благоприятные условия для продвижения новых проектов при условии выстраивания прозрачного диалога с местными сообществами.

Общероссийская картина дополняется региональными исследованиями в зонах присутствия АЭС, где общественное восприятие риска особенно

чувствительно, поскольку население непосредственно сталкивается с инфраструктурой и информационным фоном, связанным с эксплуатацией атомных объектов. Показательной является масштабная серия опросов, проводимая независимым аналитическим агентством «ИМИДЖ-ФАКТОР» в регионах расположения действующих и строящихся АЭС. По данным опроса, реализованного весной 2024 года в Тверской области, 85,8 % населения региона в целом одобряют использование атомной энергетики как одного из способов обеспечения страны электроэнергией, а в городе-спутнике Калининской АЭС – Удомле – доля сторонников мирного атома достигает 98,3 % [4]. При этом 54,5 % жителей области считают атомную энергетику наиболее перспективным источником электроэнергии, 67,3 % выступают за её активное развитие, а в Удомле доля сторонников активного развития достигает 92,8 %. Это демонстрирует, что при наличии длительного опыта безопасной эксплуатации станции, стабильных социально-экономических эффектов и системной коммуникационной работы риск воспринимается как контролируемый и оправданный, а уровень локальной поддержки проектов превышает среднероссийские показатели.

Схожая ситуация наблюдается в Ростовской области, где располагается Ростовская АЭС. В 2025 году «ИМИДЖ-ФАКТОР» провёл опрос в 11 регионах присутствия предприятий атомной отрасли с общей выборкой около 10 тыс. респондентов, из которых около 1000 – жители Донского региона. Согласно результатам исследования, 82,4 % жителей Ростовской области поддерживают использование атомной энергетики как одного из способов обеспечения потребителей электроэнергией, а в Волгодонске, городе расположения АЭС, число сторонников мирного атома достигает 92,3 % [5]. За дальнейшее активное развитие атомной энергетики в регионе высказываются 69,3 % жителей области и 81 % опрошенных в Волгодонске. В структуре ассоциаций с атомной отраслью на первый план выходят передовые технологии, эффективная замена углеводородного топлива и вклад в развитие региона, что напрямую снижает субъективный вес технологических и экологических рисков в массовом сознании.

Одновременно с региональными исследованиями публикуются обобщённые оценки поддержки атомной энергетики в масштабах всей страны. В материалах научно-делового портала «Атомная энергия 2.0», обобщающих результаты социологических опросов 2025 года, отмечается, что уровень поддержки атомной энергетики жителями России вырос и превысил 90 %, что связывается с ростом осведомлённости о роли атомной генерации в обеспечении энергетической безопасности и снижении выбросов парниковых газов [6]. Такая высокая доля сторонников создаёт принципиально иные рамочные условия для формирования стратегий развития атомной генерации в условиях энергоперехода по сравнению с периодом доминирования «постчернобыльской» повестки риска.

Сопоставление национальных и региональных данных позволяет перейти к анализу того, как общественное восприятие риска влияет на выбор площадок размещения и сценарии развития атомной генерации. Во-первых, наблюдается

чёткий разрыв между восприятием атомной энергетики «в целом» и отношением к конкретным проектам в конкретных территориях. В регионах с действующими АЭС, где население получает прямые социально-экономические выгоды – рабочие места, налоговые поступления, развитие городской инфраструктуры, – доля сторонников активного развития атомной энергетики обычно выше, чем в среднем по стране. Во-вторых, там, где энергетическая инфраструктура ассоциируется с устаревшими технологиями и экологическими издержками, а коммуникация с населением носит эпизодический характер, риск воспринимается как внешне навязанный, что усиливает сопротивление новым площадкам даже при формальном соблюдении нормативных требований.

В условиях энергоперехода выбор новых площадок для строительства АЭС или модернизации существующих мощностей детерминирован двумя группами факторов. К первой относятся технико-экономические и природно-климатические параметры: доступность охлаждающей воды, устойчивость сети, прогноз нагрузки, сейсмичность района и т.п. Ко второй – социально-политические параметры: структура занятости, опыт взаимодействия с крупными промышленными предприятиями, доверие к региональным и федеральным институтам, наличие активных экологических движений. В совокупности они формируют поле «социальной допустимости» площадки, в рамках которого общественное восприятие риска может либо расширять спектр возможных решений, либо существенно его ограничивать.

Современные коммуникационные стратегии российской атомной отрасли ориентированы на то, чтобы системно работать именно с восприятием риска на местном уровне, а не только с информированностью о технических характеристиках. В отраслевых методических материалах, посвящённых формированию общественной приемлемости атомных объектов, подчёркивается необходимость перехода от одностороннего информирования к диалогу с населением, включающему регулярные социологические измерения, работу с лидерами общественного мнения и разработку локализованных программ социального партнёрства [7]. Механизмы такого диалога позволяют учитывать не только количественные показатели поддержки, но и структуру мотивов: для части населения ключевым аргументом выступает низкоуглеродный характер атомной генерации, для других – гарантии безопасности и независимого контроля, для третьих – развитие городской среды и качество жизни.

Сценарное моделирование развития атомной генерации в условиях энергоперехода показывает, что общественное восприятие риска должно рассматриваться как ограничение того же порядка, что и доступность топливно-энергетических ресурсов или пропускная способность сетевой инфраструктуры. На макроуровне высокие показатели поддержки атомной энергетики создают благоприятный фон для включения АЭС в национальные стратегии достижения углеродной нейтральности и обеспечения гибкости энергосистемы. На мезоуровне регионов и кластеров промышленного развития различия в структуре общественного мнения определяют очередность и формат реализации проектов: в одних случаях предпочтительным

является строительство новых блоков на существующей площадке, в других – внедрение малых модульных реакторов, а в-третьих – приоритет отдаётся модернизации альтернативной генерации, чтобы не вступать в конфликт с устойчивыми негативными установками.

Критически важным элементом учёта общественного фактора становится институционализация процедур участия населения в принятии решений: общественные слушания, общественные советы, независимые экспертизы, совместные программы мониторинга окружающей среды. Практика регионов с высокой поддержкой атомной энергетики показывает, что вовлечение населения на ранних стадиях обсуждения проектов не только снижает вероятность острых конфликтов, но и позволяет адаптировать инфраструктурные решения к ожиданиям местных сообществ. В частности, при выборе площадок для новых объектов на базе действующих атомных городов приоритет получают сценарии, в которых расширение генерации увязано с развитием городской среды, социальной инфраструктуры и новых рабочих мест для молодёжи.

В заключение можно отметить, что в современных условиях энергоперехода общественное восприятие риска перестаёт быть внешним по отношению к технико-экономическим моделям развития атомной генерации и превращается в внутренний параметр проектирования. Высокий уровень поддержки атомной энергетики в России в целом, подтверждённый опросами 2019–2025 годов, соседствует с выраженной пространственной неоднородностью восприятия риска, зависящей от локального опыта эксплуатации АЭС, качества взаимодействия с населением и доверия к институтам. Эффективный выбор площадок и реалистичные сценарии развития атомной генерации требуют системной интеграции социологических данных в процессы планирования и риск-менеджмента, а также долгосрочных коммуникационных программ, позволяющих не только объяснять преимущества атомной энергетики, но и совместно с местными сообществами определять границы приемлемого риска.

Список литературы:

1. АО «Атомэнергопром». Годовой отчёт за 2018 год. – Электрон. ресурс. – Режим доступа: https://report.rosatom.ru/go/atomenergoprom/go_atomenergoprom_2018/go_atomenergoprom_2018.pdf (дата обращения: 18.11.2025).
2. АО «Атомэнергопром». Годовой отчёт за 2021 год. – Электрон. ресурс. – Режим доступа: <https://static.boomin.ru/upload/company/documents/bc9/godovoj-otcet-atomenergoprom-za-2021g.pdf> (дата обращения: 18.11.2025).
3. Анкудинов, И. А., и др. Атомная отрасль в восприятии россиян: доверие и его факторы [Электронный ресурс]. – Электрон. журн. – Режим доступа: <https://socofpower.ranepa.ru/jour/article/view/18> (дата обращения: 21.11.2025).
4. 85,8 % населения Тверской области поддерживают использование атомной энергетики. – Атомная энергия 2.0. – 16.05.2024. – Электрон. ресурс. – Режим доступа: <https://www.atomic-energy.ru/news/2024/05/16/145866> (дата обращения: 21.11.2025).

5. Более 82 % жителей Дона одобрили развитие атомной энергетики. – Атомная энергия 2.0. – 07.04.2025. – Электрон. ресурс. – Режим доступа: <https://www.atomic-energy.ru/news/2025/04/07/155106> (дата обращения: 22.11.2025).
6. Популярность и приемлемость атомной энергии: уровень поддержки атомной энергетики жителями России в 2025 году. – Атомная энергия 2.0. – 25.03.2025. – Электрон. ресурс. – Режим доступа: <https://www.atomic-energy.ru/nuclear-popularity> (дата обращения: 23.11.2025).
7. Формирование общественной приемлемости атомных объектов: методические подходы и результаты социологических опросов. – Брошюра. – М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 2020. – Электрон. ресурс. – Режим доступа: https://sng-atom.com/files/news/files/109/746/1742991335_e01f90b3e164808296.pdf (дата обращения: 23.11.2025).

© Чистяков А. В., Бускин Р. В., 2025

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВ В ТРАНСФОРМАТОРЕ

студент **Хатилов Даниэль Рустемович**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент

Лепидус Александр Анатольевич,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматривается возможность применения сверхпроводников в трансформаторах, которые позволяют снизить нагрузочные потери, уменьшить вес и размер устройства и сократить время короткого замыкания.

Ключевые слова: трансформатор, низкотемпературные и высокотемпературные сверхпроводники, гибкие сверхпроводники.

APPLICATION OF SUPERCONDUCTORS IN A TRANSFORMER

Student **Khatipov Daniel Rustemovich**,
Academic Advisor: PhD of Technical, Associate Professor
Lapidus Alexander Anatolievich,
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper examines the potential use of superconductors in transformers, which can help to reduce load losses, decrease the weight and size of the device, and shorten the duration of short-circuit events.

Keywords: transformer, low-temperature superconductors, high-temperature superconductors, flexible superconductors.

С развитием электроэнергетики применение трансформаторов стало становиться все более обширным. Их применяют сейчас в промышленности, в управлении энергетическими системами, а также в электрических системах, которые преобразуют и распределяют электрическую энергию [1, с 33].

Вследствие этого, все трансформаторы стали проходить оценку по техническим показателям. Как известно, трансформатор состоит из: магнитопровода, первичной и вторичной обмоток, изоляции, выводов обмоток, бака масла (в случае масляного трансформатора), охлаждающего устройства (вентилятора (в случае с принудительной циркуляцией воздуха), трубки охлаждения и т. п.), механизмы регулирования напряжения, защитные и измерительные устройства [2, с. 51].

Как и в любом устройстве, у трансформаторов существуют энергетические потери, которые состоят из потерь в нагрузке, которые

переходят в тепловую энергию в обмотках – электрические потери; потерь холостого хода, которые происходят в сердечнике и состоят из потерь на вихревые токи и гистерезис – магнитные потери.

С целью уменьшения потерь применяются различные способы оптимизации устройства. Одним из них является применение сверхпроводников в трансформаторе.

Сверхпроводник – это материал, который проводит ток без сопротивления, за счет чего уменьшаются электрические потери. Изображения сверхпроводников представлены на рисунке 1 [3].



Рисунок 1. Сверхпроводники

Этому направлению сейчас уделяется большое внимание. Исследования и разработки конструкций в области сверхпроводников помогают людям улучшить электротехнические устройства. Увеличение значения плотности тока, повышение удельной мощности, а также особые, присущие только сверхпроводникам физические свойства дают возможность разрабатывать высокоэффективные виды электроэнергетического оборудования, в том числе и сверхпроводниковых трансформаторов.

Одним из важных факторов создавать сверхпроводники является использование явления сверхпроводимости, т. е. состояния материалов обладать нулевым сопротивлением при их охлаждении ниже критических температур T_k . Существует два вида сверхпроводников: низкотемпературные сверхпроводники (НТСП) с максимальной T_k около 20 К ($-257\text{ }^{\circ}\text{C}$), эксплуатируемые при температурах жидкого гелия ($-268,95\text{ }^{\circ}\text{C}$), и высокотемпературные (ВТСП) с T_k до 138 К ($-135\text{ }^{\circ}\text{C}$), эксплуатируемые вблизи температуры жидкого азота 77,4 К ($-195,75\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Сейчас в трансформаторах нашли применение высокотемпературные сверхпроводники в трансформаторах. Они являются совместимыми с

нынешним оборудованием электрических сетей и их защитными устройствами. Электрические потери в ВТСП-трансформаторах при номинальном токе уменьшены на 80–90 % по сравнению с обычными трансформаторами. Использование жидкого азота вместо трансформаторного масла и уменьшенные размеры позволяют повысить экологическую и пожарную безопасность и устанавливать такие трансформаторы в зданиях [4].

График явления сверхпроводимости материала с обычным материалом показана на рисунке 2.

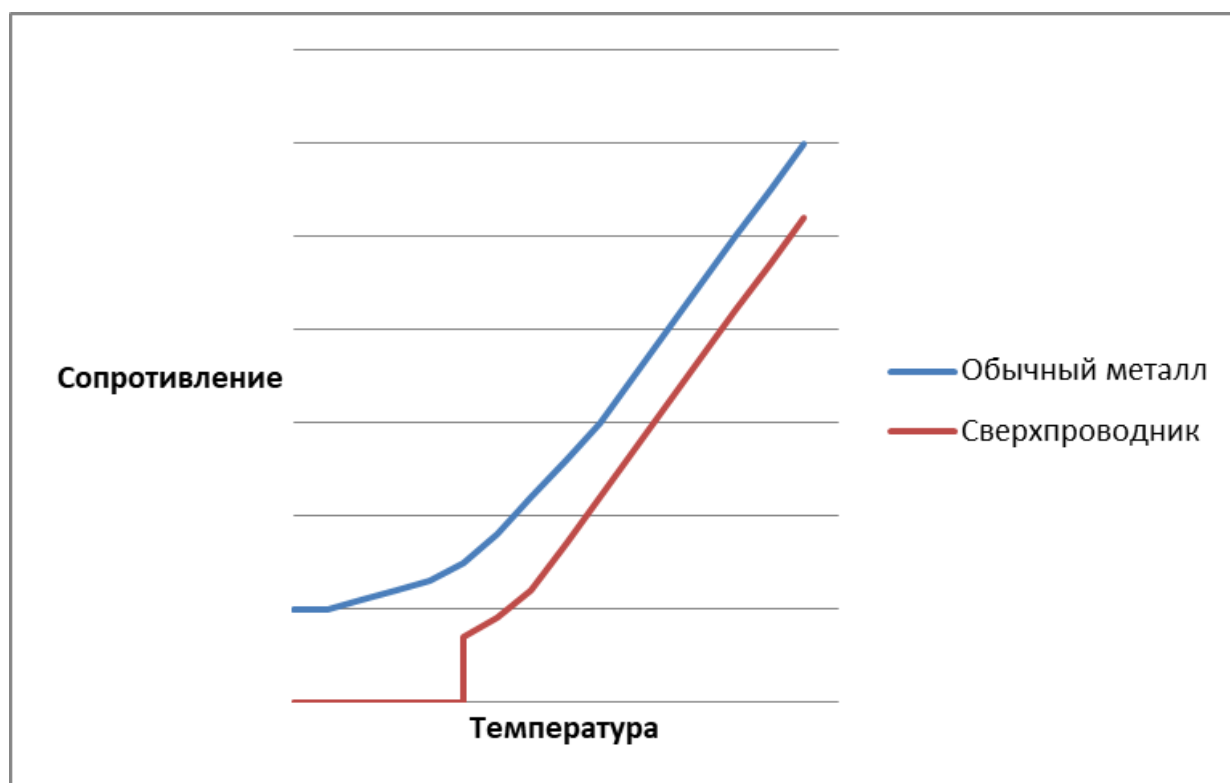


Рисунок 2. Зависимость сопротивления от температуры обычного металла и сверхпроводника

Сейчас ведутся разработки в данной области и в России, например, в Казанском федеральном университете ученые создали технологию производства гибкого высокотемпературного сверхпроводника на основе диборида магния. Технология заключается в том, что на гибкую подложку из никелевого сплава покрывается буферный слой, а сверху наносится слой сверхпроводника за счет способа магнетронного напыления, защитный и стабилизирующий слой.

Это сверхпроводник может использоваться для производства различных токоограничивающих устройств, силовых кабелей, моторов, генераторов, накопителей энергии, а также трансформаторов. Преимуществом данной технологии является снижение стоимости и массы устройства, где будет применяться этот сверхпроводник [5].

В мире уже сейчас существуют множество технологий производства сверхпроводников, вот одна из них. Высокотемпературный сверхпроводник

(ВТСП) представляет собой ленту многослойной структуры, получаемую путем послойного нанесения оксидных и металлических слоев на поверхность металлической ленты-основы. С помощью кристаллографического текстурирования либо самой металлической ленты-основы, либо одного из наносимых на ленту оксидных буферных слоев в слое этого сверхпроводника создается высокая степень двуосной кристаллической текстуры. Именно из-за такой острой двухосной текстуры ВТСП может в сверхпроводящем состоянии передавать электрический ток высокой плотности, т. е. обладает высоким значением критической плотности тока. В зависимости от способа производства и качества сверхпроводящего слоя плотность критического тока может составлять от 1 до 7 МА/см² при температуре 77 К при отсутствии внешнего магнитного поля внешнего. Если температура снижается, то токопроводящая способность ВТСП-провода повышается, а при увеличении магнитного поля – понижается [6].

Итак, можно отметить, что исследования сверхпроводящих металлов имеют широкое распространение и являются важной темой для многих направлений. Сверхпроводники в энергетической сфере необходимы для снижения электрических потерь – потерь нагрузки, в том числе и в трансформаторах, которые хотя и имеют высокий процент КПД, но за счет данной технологии этот процент можно еще улучшить.

Список литературы:

1. Электроснабжение. Силовые трансформаторы: учебное пособие для вузов / Г. Ф. Быстрицкий, Б. И. Кудрин – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2025. – 199 с. – Текст: непосредственный.
2. Тяговые и трансформаторные подстанции: учебник для вузов / Ю. М. Фролов. – Москва: Издательство Юрайт, 2025. – 84 с. – Текст: непосредственный.
3. URL: <https://www.remotvet.ru/questions/37680-kakimi-harakteristikami-obladajut-sverhprovodjaschie-materialy.html> (дата обращения 23.11.2025). – Текст: электронный.
4. Революционные сверхпроводники: [сайт]. – 2010. – URL: https://energobelarus.by/articles/tekhnologii/revolyutsionnye_cverkhprovodniki/ (дата обращения 23.11.2025). – Текст: электронный.
5. В России создана технология производства гибкого высокотемпературного сверхпроводника: [сайт]. – 2024. – URL: https://www.cnews.ru/news/top/2024-10-08_v_rossii_sozdana_tehnologiya (дата обращения 23.11.2025). – Текст: электронный.
6. Гибкий высокотемпературный сверхпроводник и способ его получения: [сайт]. – 2021. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2761855C1/ru> (дата обращения 23.11.2025). – Текст: электронный.

© Хатилов Д. Р., 2025

ОКСИД ВАНАДИЯ (III) КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ: АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

магистрант **Ларионов Денис Николаевич**,
Петрозаводский государственный университет,
г. Петрозаводск, Российская Федерация.

ст. преподаватель **Шарлаев Андрей Сергеевич**,
науч. руководитель: доктор хим. наук, доцент **Давлетбаев Руслан Сагитович**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация,

Аннотация. Проанализированы перспективы применения наноструктурированных оксидов ванадия (V_2O_5 , VO_2 , V_2O_3) в катодных материалах для энергосберегающих литий-ионных аккумуляторов. Произведено сравнение электрохимических характеристик, стабильности и проводимости различных оксидов ванадия. Особое внимание уделено взаимосвязи фазового состава, методов синтеза и энергоэффективности. Показано, что использование смеси фаз оксидов ванадия и V_2O_3 позволит снизить внутреннее сопротивление и увеличить ресурс аккумуляторов.

Ключевые слова: оксиды ванадия, нановолокна, электроспиннинг, катодный материал, литий-ионный аккумулятор, энергосберегающие технологии, удельная ёмкость, внутреннее сопротивление, срок службы.

VANADIUM (III) OXIDE AS A PROMISING MATERIAL FOR ENERGY- SAVING LITHIUM-ION BATTERIES: ANALYSIS OF PROSPECTS BASED ON STRUCTURAL FEATURES

Master Student **Larionov Denis Nikolaevich**,
Petrozavodsk State University,
Petrozavodsk, Russian Federation.

Senior lecturer **Sharlaev Andrey Sergeevich**,
Academic Advisor: Grand PhD in Chemistry, Associate Professor
Davletbaev Ruslan Sagitovich,

Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The prospects of using nanostructured vanadium oxides (V_2O_5 , VO_2 , V_2O_3) in cathode materials for energy-saving lithium-ion batteries have been analyzed. The electrochemical characteristics, stability, and conductivity of various oxides have been compared. Special attention has been paid to the relationship between phase composition, synthesis methods, and energy efficiency. It has been

shown that the use of mixed-phase oxides and V_2O_3 can reduce internal resistance and increase the battery's lifespan.

Keywords: vanadium oxides, nanofibers, electrospinning, cathode material, lithium-ion battery, energy-saving technologies, specific capacity, internal resistance, cycle life.

Современная энергетика столкнулась с необходимостью разработки высокоэффективных систем хранения энергии, соответствующих принципам энергосбережения и устойчивого развития [1]. Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) являются ключевым компонентом портативной электроники, электромобилей и систем накопления энергии для возобновляемых источников энергии. Одним из перспективных направлений повышения энергоэффективности ЛИА является поиск и модификация катодных материалов [2].

Особое место среди перспективных катодных материалов занимают оксиды ванадия. Их уникальность заключается в способности к обратимой многоэлектронной интеркаляции ионов лития, высокой теоретической ёмкости и возможности тонкого варьирования электрохимических свойств путём контроля валентного состояния ванадия [3]. Пентаоксид ванадия (V_2O_5) обладает существенным недостатком – низкой электронной проводимостью ($\sim 10^{-2} - 10^{-3}$ См/см), что приводит к значительным омическим потерям и снижению общего КПД аккумулятора [4].

В связи с этим актуальной задачей является исследование возможности применения низших оксидов ванадия (VO_2 , V_2O_3) и их смесей. Эти соединения демонстрируют на порядки более высокую электронную проводимость и структурную стабильность. Использование таких материалов позволит снизить внутреннее сопротивление аккумулятора, минимизировав энергопотери, и повысить стабильность материала при длительном циклировании, что полностью соответствует задачам энергосберегающих технологий. Особый интерес представляет V_2O_3 , обладающий металлическим типом проводимости при комнатной температуре, что открывает перспективы создания аккумуляторов с исключительно низким внутренним сопротивлением.

Методы синтеза наноструктурированных оксидов ванадия и их особенности

Для получения оксидов ванадия с улучшенными электрохимическими характеристиками применяются различные методы отжига, позволяющие получать материалы с контролируемой морфологией и фазовым составом. Каждый метод имеет свои преимущества и ограничения в контексте управления энергоэффективностью конечного продукта.

Одним из наиболее эффективных методов синтеза является электроспиннинг, позволяющий получать нановолокна с высокой удельной поверхностью (рисунок 1). Ключевыми преимуществами данного метода применительно к энергосберегающим технологиям являются: возможность создания межволоконных проводящих сетей, исключающих необходимость в значительном количестве проводящих добавок, и формирование укороченных

путей диффузии для ионов лития. Процесс синтеза включает приготовление прекурсора на основе золя ванадиевой кислоты, полученного растворением V_2O_5 в перексиде водорода, с добавлением полимеров для увеличения вязкости. Формирование волокон происходит в высоковольтном электростатическом поле при напряжениях 15-20 кВ.

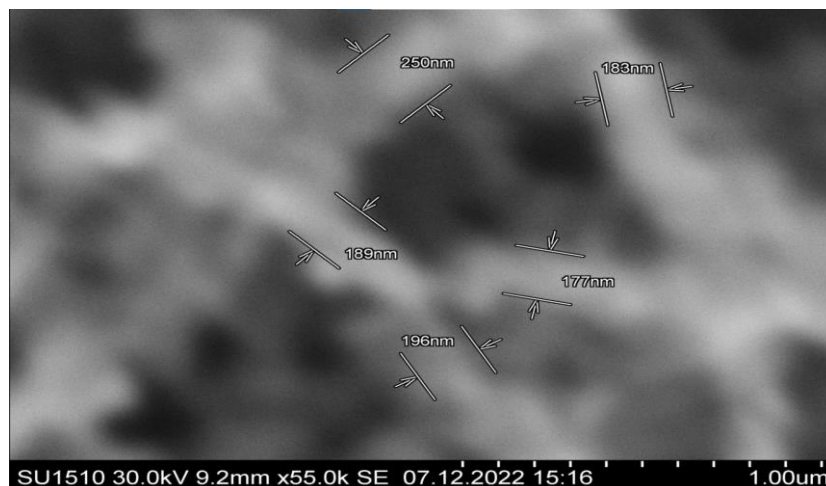


Рисунок 1. SEM-фотографии V_2O_5 при увеличении 55000

Последующий отжиг в контролируемой атмосфере является критически важным этапом, определяющим фазовый состав и, следовательно, энергоэффективность материала. Для синтеза V_2O_5 применяют отжиг в воздушной атмосфере при температуре 500°C [5]. Для получения смеси фаз (V_2O_5 , VO_2 , V_6O_{13} и др.) отжиг проводят в атмосфере аргона при введении твёрдых восстановителей (щавелевая кислота) при температурах $500\text{--}600^{\circ}\text{C}$ [6]. Синтез V_2O_5 требует более жёстких восстановительных условий – отжиг при температурах $700\text{--}800^{\circ}\text{C}$ в атмосфере с содержанием водорода 3–5 % в течение 2 – 4 часов [7]. Следует отметить, что именно сложность получения фазово-чистого V_2O_5 без примесей высших оксидов является основным вызовом при работе с этим перспективным материалом.

Альтернативными методами синтеза являются: гидротермальный синтез, химическое осаждение из газовой фазы. Однако электроспиннинг обладает неоспоримым преимуществом при создании материалов для электродов, так как позволяет формировать непрерывные проводящие пути для электронов и ионов лития, что напрямую способствует снижению внутреннего сопротивления аккумулятора.

Сравнительный анализ электрохимических характеристик оксидов ванадия

Анализ позволяет выявить четкую зависимость между степенью окисления ванадия и ключевыми параметрами, определяющими энергоэффективность материала.

По мере снижения степени окисления ванадия происходит снижение удельной ёмкости, но значительно улучшаются другие характеристики: проводимость, стабильность при циклировании. Материалы на основе смеси

фаз демонстрируют наилучшее сочетание ёмкости и стабильности, что делает их перспективными для создания энергосберегающих аккумуляторов.

Влияние морфологии и структуры на энергоэффективность

Морфология и структура материалов на основе оксидов ванадия существенно влияют на их энергоэффективность. Наноструктурированные материалы, в частности нанонити, полученные методом электроспиннинга, обладают рядом преимуществ, непосредственно влияющих на показатели энергосбережения:

- увеличение площади поверхности контакта с электролитом;
- сокращение длины диффузионных путей для ионов лития;
- создание непрерывных проводящих путей для электронов.

Исследования показывают, что нанонити V_2O_5 демонстрируют удельную ёмкость на 30-40 % выше, чем порошкообразные образцы [5]. Для смеси фаз оксидов ванадия использование волокнистой морфологии позволяет достичь сохранения ёмкости на уровне 83 % после 100 циклов, в то время как для порошкообразных аналогов этот показатель не превышает 50 % [6]. Столь значительное улучшение связано с тем, что волокнистая структура лучше компенсирует механические напряжения, возникающие при интеркаляции/деинтеркаляции ионов лития. Так, материалы, в которых сочетаются различные оксиды ванадия, позволяют сочетать высокую ёмкость V_2O_5 с хорошей проводимостью низших оксидов. Материалы на основе V_2O_5/VO_2 демонстрируют ёмкость $220\text{--}250 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ при сохранении ёмкости 80 – 85 % после 100 циклов (рисунок 2) [6].

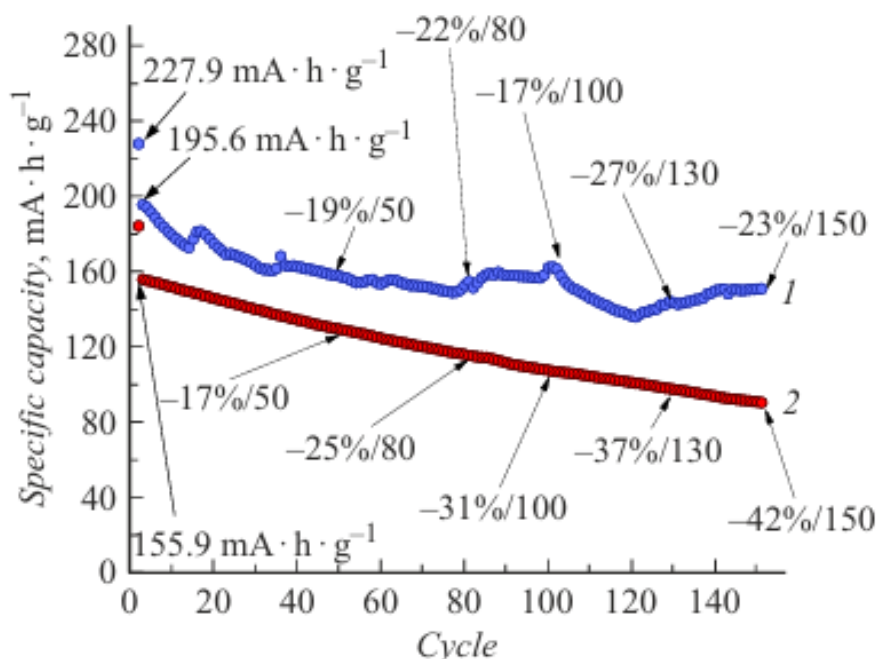


Рисунок 2. Зависимость удельной емкости нанонитей от номера цикла заряда-разряда в диапазоне потенциалов 2.0–4.0 В при плотности тока $0.2 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$.

Кривая 1 – нанонити из смеси фаз оксидов ванадия;

Кривая 2 – нанонити пентаоксида ванадия [6]

Перспективы применения в энергосберегающих технологиях

Применение наноструктурированных оксидов ванадия в литий-ионных аккумуляторах соответствует принципам энергосберегающих технологий по нескольким направлениям:

1. *Снижение внутреннего сопротивления.* Использование низших оксидов ванадия (VO_2 , V_2O_3) позволяет снизить внутреннее сопротивление аккумулятора на 50–70 % по сравнению с V_2O_5 , что уменьшает омические потери и повышает КПД [8]. Для V_2O_3 этот эффект наиболее выражен благодаря его металлической проводимости.

2. *Увеличение срока службы.* Материалы на основе смешанных фаз оксидов ванадия демонстрируют сохранение ёмкости на уровне 80–85 % после 100 циклов, что в 2–2.5 раза выше, чем для V_2O_5 [6]. Это позволяет увеличить срок службы аккумуляторов и снизить частоту их замены, что особенно важно для стационарных систем хранения энергии.

3. *Повышение эффективности при низких температурах.* Высокая проводимость низших оксидов ванадия позволяет сохранять работоспособность аккумуляторов при низких температурах, что особенно важно для применения в арктических условиях [9].

4. *Снижение энергозатрат при производстве.* Использование метода электроспиннинга позволяет получать материалы с заданными свойствами при меньших энергозатратах по сравнению с некоторыми альтернативными методами (CVD). Отсутствие необходимости в высоких давлениях и возможность непрерывного процесса делают его энергоэффективным.

Проведенный анализ показывает, что наноструктурированные оксиды ванадия, особенно их смеси фаз и низшие оксиды, являются перспективными материалами для создания энергосберегающих литий-ионных аккумуляторов. Использование таких материалов позволит:

- снизить внутреннее сопротивление на 50–70 % за счет высокой электронной проводимости низших оксидов;
- увеличить срок службы в 2–2.5 раза благодаря улучшенной структурной стабильности;
- сохранить работоспособность при низких температурах.

Наиболее перспективными направлениями дальнейших исследований являются: разработка эффективных методов получения фазово-чистого наноструктурированного V_2O_3 , экспериментальное исследование его электрохимических свойств и механизмов интеркаляции лития, а также создание композитных материалов на его основе. Реализация этих направлений может способствовать созданию нового поколения энергосберегающих аккумуляторов для применений в электромобильном транспорте, возобновляемой энергетике и портативной электронике.

Список литературы:

1. International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook 2023. Paris: IEA Publications; 2023. 189 p.
2. Zhang X., Sun X., Li X., Hu X., Cai S., Zheng C. Recent progress in rate and

- cycling performance modifications of vanadium oxides cathode for lithium-ion batteries // *Journal of Energy Chemistry*. 2021. Vol. 59. P. 343-363. DOI: 10.1016/j.jechem.2020.11.022
3. Yao J., Li Y., Massé R.C., Uchaker E., Cao G. Revitalized interest in vanadium pentoxide as cathode material for lithium-ion batteries and beyond // *Energy Storage Materials*. 2018. Vol. 11. P. 205-259. DOI: 10.1016/j.ensm.2017.10.014
4. Armer C.F., Yeoh J.S., Li X., Lowe A. Comparative study of vanadium oxide phases as cathode materials for lithium-ion batteries // *Journal of Power Sources*. 2018. Vol. 395. P. 414-423. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.05.076
5. Шарлаев, А. С. Материалы на основе нановолокон оксида ванадия для электродов электрохимических источников энергии / А. С. Шарлаев [и др.] // *Электрохимия*. – 2022. – Т. 58, № 5. – С. 226–233. – DOI: 10.31857/S0424857022050103.
6. Шарлаев, А. С. Катодный материал литий-ионного аккумулятора на основе нанонитей из смеси фаз оксидов ванадия / А. С. Шарлаев [и др.] // *Письма в Журнал технической физики*. – 2024. – Т. 50, вып. 24. – С. 12–15.
7. Liu Y., Zhang B., Yang F., Wang H., Li C. Controlled synthesis of vanadium oxides nanostructures via thermal annealing method // *Materials Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 287. P. 126-134. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126134
8. Mathew V., Sambandam B., Kim S., Kim S., Park S., Lee S. et al. Manganese and Vanadium Oxide Cathodes for Aqueous Rechargeable Zinc-Ion Batteries // *ACS Energy Letters*. 2020. Vol. 5(7). P. 2376-2400. DOI: 10.1021/acsenergylett.0c01150
9. Ларионов, Д. Н. Способы понижения температуры эксплуатации литий-ионных аккумуляторов / Д. Н. Ларионов // *Материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ»*. – Кемерово, 2025.

© Ларионов Д. Н., Шарлаев А. С., 2025

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА В СТЕКОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

студент **Фролова Любовь Вячеславовна,**

студент **Конакова Ульяна Николаевна,**

науч. руководитель: ст. преподаватель **Галкина Марина Игоревна,**

Нижегородский институт управления – филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации,
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Аннотация. Внедрение бережливого производства актуально для предприятий по производству листового стекла благодаря необходимости оптимизации производственных процессов, устранения потерь и повышения качества продукции. Это связано с тем, что в традиционном производстве есть проблемы, которые требуют устранения: перепроизводство, время ожидания, избыточные запасы, неэффективная логистика и транспортировка.

Ключевые слова: бережливое производство, методика, «12 шагов», система 5S, 5 почему, АО «Борский стекольный завод».

EFFICIENCY OF IMPLEMENTING A LEAN MANUFACTURING SYSTEM AT A SHEET GLASS MANUFACTURING PLANT

Student **Frolova Lyubov Vyacheslavovna,**

Student **Konakova Ulyana Nikolaevna,**

Academic Advisor: Senior Lecturer: **Galkina Marina Igorevna,**

Nizhny Novgorod Institute of Management – branch of the Russian
Presidential Academy of National Economy and Public Administration,
Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. The implementation of lean manufacturing is relevant for sheet glass manufacturers due to the need to optimize production processes, eliminate waste, and improve product quality. This is due to the following issues in traditional manufacturing that require addressing: overproduction, waiting times, excess inventory, inefficient logistics and transportation.

Keywords: lean manufacturing, methodology, «12 steps», 5S system, 5 whys, JSC «Bor Glassworks».

В современных рыночных условиях предприятия стекольной промышленности сталкиваются с растущей конкуренцией и требовательностью потребителей к качеству продукции. Внедрение системы бережливого производства становится стратегическим императивом для стекольных заводов, позволяющим значительно повысить эффективность технологических процессов и усилить конкурентные преимущества.

Бережливое производство (Lean, LeanManufacturing) – это методология управления, направленная на сокращение потерь при производстве, улучшение качества продукта и повышение эффективности процессов. Основная цель – дать клиенту как можно больше ценности при меньших затратах [1].

Таблица 1. Основные принципы бережливого производства

Определение ценности продукта для потребителя	Бизнес должен понимать сильные стороны своего товара или услуги, за которые покупатели выбирают его. Эту ценность нужно поддерживать на том же уровне и улучшать, если есть такая возможность
Добавление в продукт других ценностей	Любой бизнес будет развиваться и улучшать свой продукт, это можно сделать на этапе бережливого производства. Нужно определить, чем еще продукт будет интересен покупателю, и развивать это
Оптимизация цикла производства продукта	На предыдущих этапах бизнес определяет, на чем нельзя экономить, а после этого может сокращать свои затраты в других сферах
Определение необходимого количества продукта	Это нужно, чтобы производить и доставлять столько товара, сколько можно продать. Лишний товар будет лежать на складе, а если товара не хватит, покупатель уйдет к конкуренту
Стремление к совершенству	Этот принцип предполагает постоянную модернизацию бизнеса. Бережливое производство не должно быть разовой оптимизацией, нужно постоянно искать пути для сокращения затрат

Внедрение инструментов бережливого производства является ключевым фактором повышения эффективности и конкурентоспособности современных предприятий. Данные методы направлены на сокращение потерь, оптимизацию ресурсов и постоянное совершенствование бизнес-процессов. В таблице ниже представлены основные инструменты, которые успешно применяются в различных отраслях промышленности и сферы услуг.

Таблица 2. Основные методы бережливого производства

Система 5S	⇒	Методология организации рабочего пространства, включающая пять этапов: сортировка, соблюдение порядка, содержание в чистоте, стандартизация и совершенствование
Картирование потока создания ценности	⇒	Инструмент для анализа и визуализации всех этапов процесса производства, от начала до конца, с целью выявления потерь и возможностей для оптимизации

Быстрая переналадка	⇒	Метод, позволяющий значительно сократить время переналадки оборудования
Защита от ошибок	⇒	Системы, предотвращающие возникновение ошибок при выполнении операций
Канбан	⇒	Система управления потоком производства с использованием визуальных сигналов для регулирования количества материалов или продукции на каждом этапе
Стандартизация работы	⇒	Установление стандартных процедур и инструкций для обеспечения единообразия и качества выполнения операций
Визуализация	⇒	Использование визуальных инструментов (например, канбан-досок или андонов) для повышения прозрачности процессов и облегчения контроля
Всеобщее обслуживание оборудования	⇒	Комплексный подход к обслуживанию оборудования, который включает в себя профилактическое обслуживание и участие всех сотрудников в поддержании его работоспособности
JIT (Just in Time)	⇒	Принцип «точно в срок», при котором детали и материалы поступают на производственную линию именно тогда, когда они необходимы
Кайдзен	⇒	Философия непрерывного улучшения всех процессов, в котором участвуют все сотрудники

В каждой успешной компании процесс улучшения является неотъемлемой частью системы менеджмента. Как правило, такие компании результативно применяют различные бережливые методики, адаптируя их к условиям и специфике своего бизнеса. Одной из ключевых методик, реализующих принцип постоянного совершенствования, является методика «12 шагов», успешно применяемая на АО «Борский стекольный завод». Эта методика служит практическим инструментом для систематического решения проблем и воплощения рассмотренных выше методов Lean на практике [2].



Рисунок 1. Структура динамики «12 шагов решения проблем»

Цель методики «12 шагов», применяемой на Борском стекольном заводе (рис. 1), – выполнение постоянных улучшений, включающих в себя правила и последовательность действий по решению проблем. Данная методика применима как для работы с несоответствиями и их причинами, так и для выполнения улучшений, например, повышения возможностей процессов, сокращения потерь [3].

Важным условием результативного применения методики «12 шагов» в целях постоянного улучшения служит вовлеченность персонала. Для этого в производственной системе Борского стекольного завода используется выражение «2В+3в», где:

2В («большое») – «Всесторонне расширять свои знания» и «Выработать свои основные правила»;

3в («малое») – «верное место», «верный объект» и «верные факты».

Смысл этого выражения в том, что прежде, чем идти в гемба и проводить улучшения, необходимо сформировать потребность в них. Ее нельзя создать на первом совещании рабочей группы, поставив задачу улучшения и пообещав вознаграждение за ее решение. Речь идет о том, чтобы дать новые знания, рассказать о новых подходах в менеджменте, показать стратегию компании и довольно долго обсуждать их, чтобы каждый сотрудник:

- сформировал глубокое понимание новой для себя информации;
- получил первичные навыки применения новых подходов и инструментов;
- сформировал собственное отношение к новым знаниям и навыкам.

На Борском стекольном заводе для этих целей служит Школа AES (Школа Системы бизнес-совершенства). Это постоянно действующий внутренний институт, в котором происходит развитие сотрудников компании (2В) – от операторов до заместителей директора. Задача тренеров Школы AES – так преподнести новую информацию участникам, чтобы те захотели ее применить на практике, протестировать. На это выделяется от двух до десяти

дней. В результате операторы и мастера, прошедшие тренинг по теме «8 видов потерь» или «Диаграмма потока материалов и информации» (Material and Information Flow Diagram, MIFD), начинают видеть такие проблемы цеха и участка, которые до этого не замечали. А затем пробуют их устранить, добиваются успеха, пусть не всегда с первого раза (3в). И начинают верить в то, что успешное будущее зависит от них, причем каждый из них на своем месте может улучшить процесс так, что результат будет не только заметен, но и значим для компании в целом.

Таким образом, системная подготовка персонала по формуле «2В+3в» создает прочную основу для успешного выполнения следующей ключевой компоненты методики – двенадцатишагового алгоритма решения проблем.

Данная методика включает следующие шаги:

Шаг 1: Проблему нужно формулировать как разрыв между желаемым и фактическим состоянием, а не просто констатацию факта, чтобы показать необходимость улучшений.

Шаг 2: необходимо собрать и проанализировать данные, используя инструменты вроде диаграммы Парето, чтобы выявить и приоритизировать ключевые факторы, влияющие на проблему.

Шаг 3: Цель должна быть конкретной и связывать локальное улучшение на рабочем месте со стратегическими показателями всего подразделения.

Шаг 4: для решения проблемы формируется команда из операторов и мастера, которая выбирает инструмент работы и обеспечивает вовлеченность всех участников.

Шаг 5: Команда переходит в цех (гемба), чтобы собрать информацию и выдвинуть гипотезы о том, где возникает и почему не обнаруживается дефект.

Шаг 6: Анализ фактов сужает область поиска корневой причины до конкретного участка процесса, где потенциально может возникать дефект.

Шаг 7: с помощью инструментов (например, диаграммы Исикавы и «5 Почему?») выявляются и затем проверяются потенциальные корневые причины проблемы.

Шаги 8-9: Команда совместно со специалистами разрабатывает и внедряет план действий по устранению подтвержденных корневых причин.

Шаги 10-11: Результаты действий проверяются для подтверждения решения проблемы и мотивации команды, демонстрируя полученный экономический эффект.

Шаг 12: Успешные изменения фиксируются в новых рабочих инструкциях и стандартах, чтобы закрепить улучшенную практику и предотвратить повторение проблемы.

Эффективность рассмотренных инструментов и методологий бережливого производства наглядно демонстрируют примеры их применения на АО «Борский стекольный завод». Рассмотрим, как методы «5 Почему» и «5S» используются для решения конкретных производственных задач.

Метод «5 почему» в бережливом производстве – это простой и эффективный инструмент для выявления первопричины проблемы путем последовательного задавания вопроса «Почему?». В отличие от поиска

быстрых решений, он помогает найти коренную причину проблемы, чтобы предотвратить ее повторение в будущем, путем создания цепочки причинно-следственных связей.

Безопасная транспортировка и утилизация боя стекла DLF формата.

Транспортировка бойных блоков с локаций склада осуществляется на стандартных пирамидах. Риск по безопасности из-за выпадения осколков стекла при транспортировке по территории склада и производства и во время утилизации на бункере [4].

Ситуация до улучшения:

- При установке, транспортировке и утилизации DLF формата стекла присутствует риск выпадения боя стекла т. к. транспортировка осуществляется на стандартных пирамидах.
- Пол склада имеет повреждения. Уголки защиты технологических швов повреждены.

Задача: минимизировать количество поврежденных участков пола на складе.

Цель: снизить существующий риск при транспортировке и утилизации блоков стекла с боем.

1. Поиск корневых причин. Это систематический процесс выявления первоисточника проблемы, а не просто ее внешних симптомов. Его главная цель – найти исходную причину сбоя, чтобы предотвратить повторное возникновение аналогичной ситуации (рис. 2).

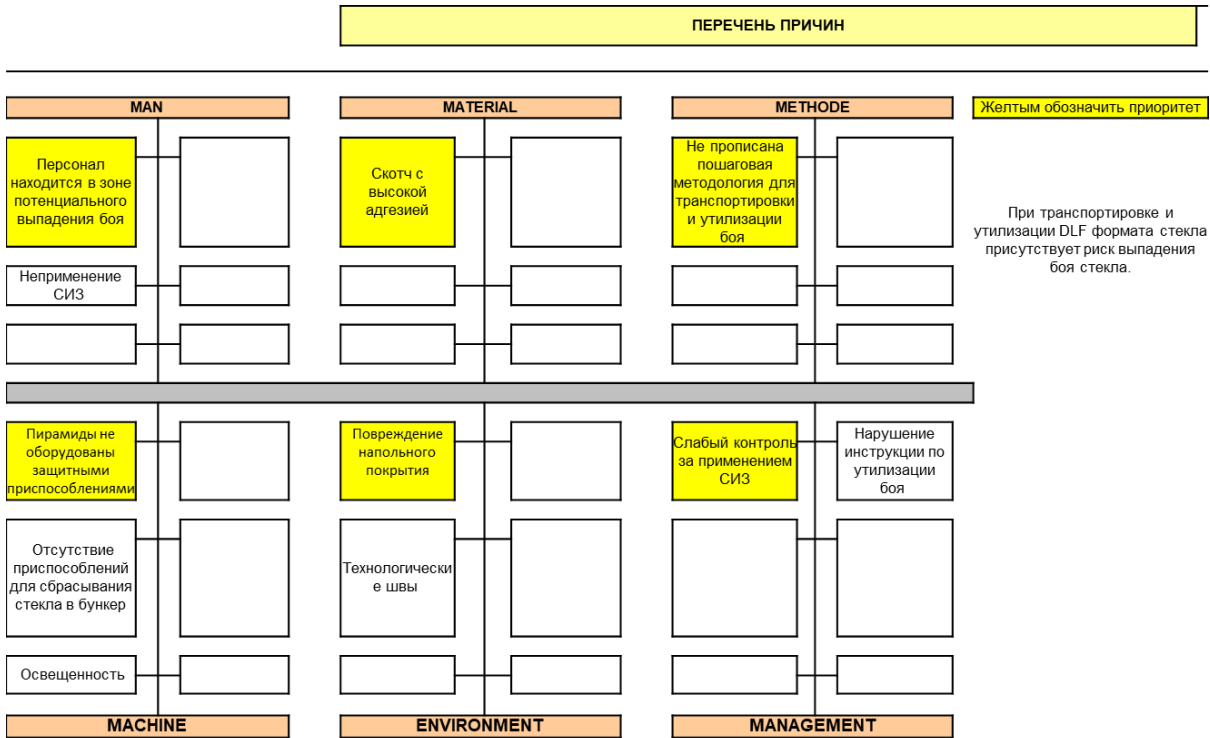


Рисунок 2. Поиск корневых причин

2. Поиск корневых причин – анализ 5 почему. Данный метод заключается в последовательном задавании вопроса «Почему?» для углубления в суть проблемы (рис. 3).

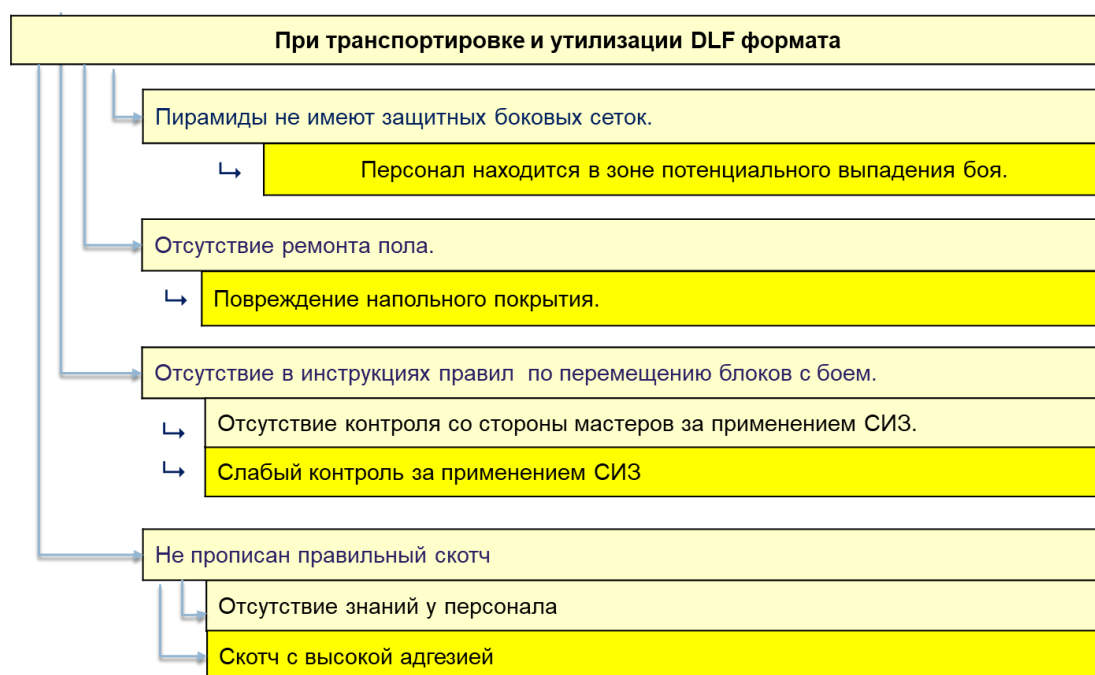


Рисунок 3. Поиск корневых причин – анализ 5 почему

3. Корневые причины и корректирующие действия. После выявления корневой причины разрабатываются корректирующие действия, направленные именно на ее устранение (табл. 3).

Таблица 3. Корневые причины и корректирующие действия

Корневая причина	Корректирующие действия	Срок	Дата	Выполнение	Результат
Персонал находится в зоне потенциального выпадения боя	Обновить инструкции для персонала с пошаговыми действиями при выставлении, перемещению и утилизации бойных блоков	01.11.24	01.07.24		
Пирамиды не оборудованы защитными приспособлениями	Разработка пирамиды	01.05.24	01.05.24	ОК	ОК
	Изготовление пирамиды	01.06.24			
Повреждение напольного покрытия	Провести ремонт поврежденных участков	31.12.25	01.08.24	частично	ОК
Слабый контроль за применением СИЗ	Усиление контроля за использованием СИЗ	постоянно	С марта постоянно	ОК	ОК
Скотч с высокой адгезией	Замена скотча для проклейки бойных блоков перед транспортировкой (вместо серого использовать прозрачный)	постоянно	С марта постоянно	ОК	ОК

4. Стандартизация

До улучшения:

- перемещение блоков стекла с боем на необорудованных пирамидах;
- повреждение напольного покрытия (технологических швов).

После улучшения:

- изготовление пирамиды для перемещения и утилизации бойных блоков с защитными сетками;
- ремонт технологических швов.

Помимо решения точечных проблем, таких как транспортировка боя стекла, на предприятии активно используются методы организации рабочего пространства. Ярким примером служит внедрение системы 5S, которая направлена на устранение потерь, связанных с беспорядком и неэффективной организацией [5].

Методика 5S:

- сортируй;
- создавай порядок;
- содержи в чистоте;
- стандартизируй;
- совершенствуй.

Таблица 2. Вид и содержание метода 5S

Мероприятия	Суть мероприятия
1. Сортируй	На рабочем месте, в шкафах, на стеллажах находятся только необходимые предметы. Проходы свободные, на доске объявлений обновленная информация
2. Создавай порядок	Рабочая зона обозначена, опасная зона выделена по правилам охраны труда На оборудовании нет утечек масла, воды, воздуха Средства защиты на оборудовании в рабочем состоянии, оснастка идентифицирована
3. Содержи в чистоте	Оборудование, инструмент, рабочее место, индикаторы контроля чистые, освещение хорошее
4. Стандартизируй	Сотрудники знают свои обязанности и требования контрольных листов по 5S
5. Совершенствуй	Все сотрудники прошли обучение по 5S и обращают внимание на несоблюдение правил и норм по охране труда

Результаты внедрения методов бережливого производства на АО «Борский стекольный завод»:

- повышение производительности труда: оптимизация процессов и сокращение ненужных операций;
- снижение расходов: уменьшение отходов (потерь), сокращение затрат на хранение и транспортировку;
- улучшение качества продукции: стандартизация процессов и постоянный контроль качества;
- сокращение времени производственного цикла: устранение узких мест и оптимизация потоков;
- вовлечение персонала: сотрудники на всех уровнях участвуют в поиске и реализации улучшений, что способствует укреплению корпоративной культуры;
- улучшение условий труда и безопасности: создание более комфортного и безопасного рабочего пространства, снижение числа несчастных случаев;
- стандартизация рабочих мест: создание четких правил и процедур для поддержания порядка.

Внедрение бережливого производства на предприятии по изготовлению листового стекла представляет собой не разрозненное применение инструментов, а целостную систему.

Ключевой результат заключается в демонстрации того, как теоретические принципы Lean (такие как ориентация на ценность для потребителя и стремление к совершенству) находят свое практическое воплощение через конкретные методики. На примере АО «Борский стекольный завод» была показана методика «12 шагов», которая служит стратегическим каркасом для непрерывных улучшений. Она связывает локальные инициативы на уровне цеха с глобальными стратегическими целями предприятия. Важнейшим условием ее успеха является подготовка кадров, что в полной мере реализуется через выражение «2В+3в» и работу Школы AES, формируя у сотрудников не только необходимые навыки, но и личную заинтересованность в преобразованиях.

Представленные практические кейсы с использованием методов «5 Почему» и «5S» наглядно иллюстрируют этот механизм. «5 Почему» позволяет докапываться до корневых причин проблем (как в случае с транспортировкой боя стекла), а «5S» создает фундамент для стабильности и порядка, без которого любое последующее улучшение неустойчиво.

Очевидно, что успех внедрения бережливого производства на стекольном заводе определяется синергией трех элементов: системной методологии, развитой корпоративной культуры, основанной на постоянном обучении, и грамотного применения конкретных инструментов Lean. Такой комплексный подход позволяет не просто устранять потери, но и создавать среду для непрерывного саморазвития предприятия, что является залогом его долгосрочной конкурентоспособности.

Список литературы:

1. Умная оптимизация: что такое бережливое производство и зачем его внедрять: сайт / национальныепроекты.рф. – URL: <https://национальныепроекты.рф/news/umnaya-optimizatsiya-cto-takoe-berezhlivoe-proizvodstvo-i-zachem-ego-vnedryat/> (дата обращения: 18.11.2025). – Текст: электронный.
2. Компания AIG – история, производство, миссия: сайт / aigrus.ru. – URL: <https://aigrus.ru/about-us/> (дата обращения: 18.11.2025). – Текст: электронный.
3. «12 шагов решения проблем»: опыт практического применения для улучшения процессов: сайт / ПРИОРИТЕТ. – URL: <https://centr-prioritet.ru/publikatsii/4257-12-shagov-resheniya-problem-opyt-prakticheskogo-primeneniya-dlya-uluchsheniya-protsessov> (дата обращения: 18.11.2025). – Текст: электронный.
4. Обучение сотрудников АО «Эй Джи Си Борский стекольный завод» по теме «Перспективное планирование качества продукции и план управления (APQP). Процесс согласования производства автомобильных компонентов (PPAP)»: сайт / ПРИОРИТЕТ. – URL: <https://centr-prioritet.ru/company/news/122-vse-novosti/4317-obuchenie-sotrudnikov-ao-ej-dzhi-si-borskij-stekolnyj-zavod-po-teme-perspektivnoe-planirovanie-kachestva-produktsii-i-plan-upravleniya-apqp-protsess-soglasovaniya-proizvodstva-avtomobilnykh-komponentov-ppap> (дата обращения: 18.11.2025). – Текст: электронный.
5. Бережливое производство: 5S, кайдзен и пока-йоке в российских реалиях: сайт / noboring-finance. – URL: <https://noboring-finance.ru/gazeta/berezhlivoe-proizvodstvo-5s-kajdzen-i-poka-joke-v-rossijskih-realiyah> (дата обращения: 18.11.2025). – Текст: электронный.

© Фролова Л. В., Конакова У. Н., 2025

ВЫБОР СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АРХИТЕКТУРНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ И ДИНАМИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ СВЕТОВОЙ СРЕДЫ

студент **Султанова Руфина Рафаильевна**,
доцент **Гаврилов Вадим Александрович**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Архитектурное освещение стало одним из наиболее модных направлений в городском освещении и дизайне света. Его популярность объясняется тем, что оно сочетает в себе две важные функции: эстетику и функциональность. Во-первых, архитектурное освещение помогает создать красоту и гармонию вокруг городских построек и объектов, преобразая обычные улицы в произведения искусства. Во-вторых, архитектурное освещение играет важную роль в коммерческой деятельности, привлекая внимание к зданиям и сооружениям, повышая их привлекательность для потенциальных клиентов и посетителей.

Ключевые слова: архитектурное освещение, управление, DMX, протокол, диммирование, светодиод.

CHOOSING AN ARCHITECTURAL LIGHTING CONTROL SYSTEM FOR OPTIMIZING ENERGY CONSUMPTION AND DYNAMICALLY SHAPING THE LIGHT ENVIRONMENT

Student **Sultanova Rufina Rafailyevna**,
Associate Professor **Gavrilov Vadim Alexandrovich**,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federatoin

Abstract. Architectural lighting has become one of the most fashionable trends in urban lighting and light design. Its popularity is explained by the fact that it combines two important functions: aesthetics and functionality. Firstly, architectural lighting helps to create beauty and harmony around urban buildings and objects, transforming ordinary streets into works of art. Secondly, architectural lighting plays an important role in commercial activities, drawing attention to buildings and structures, increasing their attractiveness to potential customers and visitors.

Keywords: architectural lighting, control, DMX, protocol, dimming, LED.

Система управления освещением – это электронная сеть, которая позволяет автоматически регулировать включение, выключение, интенсивность света. Контроль над освещением ведется с использованием различных протоколов. В основе протоколов управления освещением лежит программный код, благодаря

чему каждый протокол можно интегрировать друг в друга, объединять и создавать единую систему, используя контроллеры, разветвители сигналов.

Особенно актуально это для коммерческих объектов, где качественное световое оформление может стать решающим фактором в привлечении клиентов и арендаторов. В условиях жесткой конкуренции на рынке недвижимости эффективное световое решение становится важным инструментом продвижения и повышения стоимости объекта [1].

Разработка и внедрение архитектурной подсветки – это область, которая тесно связана с инновациями в области технологий управления. Различные протоколы управления играют ключевую роль в обеспечении надежности, масштабируемости и удобства эксплуатации систем архитектурной подсветки.

Системы управления архитектурным освещением условно можно разделить на традиционные и цифровые.

Традиционные решения включают релейные блоки, автоматы времени и простые диммеры (например, с интерфейсом 1-10 В). Они отличаются простотой и низкой стоимостью, но не позволяют реализовать сложные сценарии и динамические эффекты [6].

Современные цифровые системы используют специализированные протоколы управления:

- Digital Addressable Lighting Interface (DALI) – протокол, позволяющий адресно управлять отдельными светильниками или их группами.
- Digital Multiplex (DMX512) – стандарт, используемый в сценическом и архитектурном освещении для создания динамических световых сценариев. Отличается высокой скоростью передачи данных.
- Connectivity Network Exchange (KNX) – универсальный протокол автоматизации зданий, обеспечивающий интеграцию освещения, климат-контроля и систем безопасности.
- Беспроводные решения (ZigBee, Bluetooth Mesh, Wi-Fi) – обеспечивают гибкость и простоту внедрения, что особенно актуально при реконструкции зданий и на объектах малого масштаба.

Важно отметить, что выбор правильного протокола зависит от конкретных требований проекта, включая бюджет, масштабы и функциональность [5].

Возможные механизмы оптимизации энергопотребления:

1. Адаптивное диммирование и датчики присутствия: Современные системы (особенно DALI и беспроводные) позволяют интегрировать датчики освещенности и присутствия. Освещение может автоматически снижать интенсивность (диммироваться) при достаточном естественном освещении и когда в зоне никого нет. Это приводит к прямой экономии электроэнергии до 30-50 % по сравнению с системами, работающими в статичном режиме.

2. Сценарное управление и таймеры: Энергосбережение достигается за счет точного планирования работы освещения. Например, в ночные часы (после 23:00) яркость фасадной подсветки может автоматически снижаться на 50 %, а в коммерческий час пик (с 18:00 до 22:00) – работать на полную мощность. Системы на базе KNX и современных контроллеров позволяют легко программировать такие сценарии с учетом дней недели и праздников.

3. Мониторинг энергопотребления: Продвинутое протоколы, такие как DALI-2 и KNX, позволяют собирать данные об энергопотреблении каждого светильника в реальном времени. Это дает возможность проводить аудит, выявлять неэффективные режимы работы и оптимизировать их, а также прогнозировать затраты на обслуживание.

4. Эффективность светодиодов и управление: Светодиоды сами по себе энергоэффективны, но их максимальный потенциал раскрывается только при точном управлении. Протоколы вроде DMX и DALI обеспечивают точное диммирование без сдвига цветовой температуры и без мерцания, что сохраняет комфорт света и его эффективность [4].

Таблица 1. Критерии выбора системы управления для решения ключевых задач

Ключевая задача	Критически важные критерии	Наиболее подходящие протоколы/решения
Оптимизация энергопотребления	Точное адресное диммирование Интеграция с датчиками (присутствия, освещенности) Мониторинг энергопотребления в реальном времени	DALI/DALI-2 KNX ZigBee (и другие беспроводные решения)
Динамическое формирование световой среды	Высокая скорость обновления данных Большое количество управляемых каналов на один прибор (RGB, позиция и др.) Гибкость программирования сложных сценариев	DMX512 Специализированное ПО для визуализации и управления (в связке с DMX)

Среди инженеров автоматизированных систем управления наружным освещением протокол DMX512 определяется как лучший инструмент для работы с динамическими сценариями, но также стоит рассмотреть его при совместной работе с протоколом управления DALI.

Таким образом, DALI используется для управления основным заливающим и функциональным освещением фасада. Он отвечает за энергоэффективность: интеграция с датчиками освещенности позволяет автоматически снижать яркость в ясные лунные ночи, а датчики присутствия отключают подсветку малопосещаемых участков. В это время DMX512 управляет RGB-прожекторами и акцентными светильниками, создавая динамические цветовые сценарии в различных программных обеспечениях (например, LEDBuild, Light Stream, LIGHTCAD и т.д.) и медийные инсталляции для праздников и важных событий.

На выходе этой коллаборации обе системы объединяются через шлюз (gateway) в единый интерфейс управления, что позволяет создавать комплексные сценарии. Например, в рабочем режиме после полуночи система на DALI снижает общую яркость, а DMX-сценарий переключается в экономный монохромный режим [3].

Большинство производителей профессионального архитектурного освещения предлагают уже готовые светильники со встроенными контроллерами и блоками питания, что значительно упрощает внедрение системы управления освещением и снижает затраты на дополнительное обслуживание светодиодного оборудования [2].

Выбор системы управления архитектурным освещением – это комплексная задача, требующая учета множества факторов. Правильное решение позволит не только улучшить визуальное восприятие объекта, но и повысить его функциональность и энергоэффективность. Важно помнить, что архитектурное освещение – это не просто технический аспект, а важная составляющая общего дизайна и атмосферы пространства.

Список литературы:

1. Архитектурное освещение, архитектурное освещение фасадов: [сайт]. – 2022. – URL: <https://lightru.pro/arhitekturnoe-osveshhenie/> (дата обращения 15.11.2025) – Текст: электронный.
2. Управление архитектурным освещением: [сайт]. – 2021. – URL: <https://www.mdm-light.ru/publications/upravlenie-arkhitekturnym-osveshcheniem/> (дата обращения 15.11.2025). Текст: электронный.
3. Сапрыкин, А. Современные дополнительные требования, предъявляемые к светильникам архитектурно-художественного освещения, управляемым по DMX/RDM или DALI // Полупроводниковая светотехника. – 2021. № 4. – С. 72. Текст: непосредственный.
4. Козлов, С. И. Методика выбора системы управления архитектурно-художественной подсветкой фасадов / С. И. Козлов, А. А. Новиков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 5–6. – С. 112–120. Текст: непосредственный.
5. Doulos, L. T., Kontadakis, A., Madias, E. N. A review of smart lighting systems for urban and architectural applications. *Energy and Buildings*, 274, 112432. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670719304846> (date accessed: 17.11.2025).
6. Villa, C., Labayrade, R. Multi-criteria decision-making for lighting solutions in public spaces: A review of methods and tools. *Lighting Research & Technology*, 53(5), 435–455. URL: https://www.researchgate.net/publication/326713110_A_multi-criteria_decision_making_approach_for_public_lighting_system_selection (date accessed: 17.11.2025).

© Султанова Р. Р., Гаврилов В. А., 2025

АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА НА ПРОИЗВОДСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

магистрант **Садыков Рамис Дамирович**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент **Катасёва Дина Владимировна**,
Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А. Н. Туполева,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В представленной работе рассмотрены преимущества внедрения искусственных нейронных сетей для автоматизации контроля качества продукции на производственном предприятии. Описан процесс цифровизации визуального контроля, проанализированы основные этапы создания и интеграции системы, приведены примеры технической реализации. Сделан вывод о влиянии высокоточных нейросетевых решений на снижение брака, повышение скорости проверки и снижение трудозатрат.

Ключевые слова: контроль качества, нейросети, автоматизация, цифровизация, машинное зрение, производство, искусственный интеллект.

AUTOMATION OF QUALITY CONTROL IN MANUFACTURING USING NEURAL NETWORKS

Master Student **Sadykov Ramis Damirovich**,
Academic Advisor: PhD in Engineering, Associate Professor
Kataseva Dina Vladimirovna,
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev,
Kazan, Russian Federation

Abstract. This paper presents the advantages of implementing artificial neural networks for automating product quality control in manufacturing. The process of digitalization of visual inspection and main stages of system development and integration are described. Examples of technical implementation are given. The influence of high-precision neural networks on reducing defects, increasing testing speed and reducing labor costs is discussed.

Keywords: quality control, neural networks, automation, digitalization, machine vision, manufacturing, artificial intelligence.

Введение

Современное машиностроение и смежные отрасли стремятся к постоянному повышению точности и скорости контроля изделий с целью обеспечения высокого качества продукции. В условиях роста конкуренции и требований к минимизации производственных издержек классические методы контроля – визуальные проверки операторами, механические шаблоны и

ручные процедуры – уже не обеспечивают требуемого уровня надёжности, слишком медленны, требуют больших трудозатрат и подвержены человеческому фактору, что снижает общую эффективность производства [1, с. 13].

Наиболее остро это проявляется на предприятиях массового производства с быстрым конвейерным темпом выпуска, где любые задержки в контроле ведут к потере времени и денег. В последние годы значительный интерес и успех демонстрирует внедрение автоматизации на базе искусственных нейронных сетей (ИНС), полностью меняя подход к качественному контролю и позволяя уйти от субъективности человеческой оценки к объективному и быстрому машинному анализу [2, с. 17].

Описание проблемы

Ручной визуальный контроль не может гарантировать однородности и точности результатов: операторы могут уставать, отвлекаться, по-разному оценивать один и тот же дефект или не заметить микроскопические повреждения. Погрешности такого подхода типичны для крупной и непрерывной индустрии, особенно заметны на скоростных линиях – оператор не может ритмично и правильно идентифицировать дефекты при большой скорости прохождения изделий. Это ведет к выпуску брака, необходимости повторных проверок и потере доверия клиентов к качеству продукции.

Решить эти задачи позволяет применение автоматизированных систем машинного зрения, чему способствует бурное развитие технологий глубокого обучения и компьютерного зрения [2, с. 34].

Техническое решение

ИНС, обученные на большом массиве изображений «годных» и «бракованных» изделий, способны различать невидимые глазу дефекты – микротрещины, смещения, неточности сборки. Алгоритмы сверточных нейронных сетей (CNN) анализируют поступающие с камеры данные в реальном времени и выдают вердикт о допуске или выбраковке изделия. На рисунке 1 приведена схема такой системы.



Рисунок 1. Архитектура нейросетевой системы контроля качества

В производственных условиях камеры устанавливаются на конвейере, после прохождения каждого объекта запускается автоматическое фотографирование и запуск процесса распознавания.

Если сеть обнаруживает аномалию, изделие отводится на дополнительную проверку; ординарные объекты автоматически переходят в отгрузку.

Особенности обучения сети связаны с необходимостью включения изображений разных типов дефектов, а также регулярной дообучаемостью по новым данным, поступающим с предприятия [3, с. 104].

Особенности внедрения

Для высокого качества работы нейросети важно обучить её на разнообразных представлениях дефектов, включая редкие и нестандартные случаи: разломы, трещины внутри материалов, отклонения цвета, геометрии, нарушения целостности покрытия. Рекомендуется периодически дообучать сеть на данных, поступающих непосредственно с предприятий («in-production learning»), что особенно актуально при запуске новых моделей изделий или внедрении новых материалов. Типовая процедура обучения включает этап разметки изображений, формирование обучающей выборки и тестовой серии, настройку архитектуры сети и регулярную переоценку точности модели [3, с. 134].

Особое внимание рекомендуется уделять калибровке системы – подбору камеры, освещённости, фону и расстояния до объекта, что минимизирует риск ложноположительных или ложноотрицательных решений. Например, практика показывает, что даже небольшое изменение условий съёмки способно негативно повлиять на работу нейросети, поэтому важно внедрять автоматические механизмы самокалибровки и мониторинга стабильности качества.

Преимущества и результаты

Внедрение автоматизированных систем контроля, построенных на базе нейронных сетей и технологий компьютерного зрения, открывает новые возможности для промышленности и массового производства. Прежде всего, такие решения обеспечивают высокую точность распознавания дефектов даже при сложных или неочевидных нарушениях, которые трудно заметить человеческим глазом или стандартными сенсорными системами. Нейросети способны анализировать изображения и параметры продукции в реальном времени, классифицировать объекты по десяткам и сотням признаков, что повышает вероятность обнаружения брака и предотвращает его попадание на склад или к потребителю.

Один из наиболее ценных эффектов – значительное ускорение цикла проверки. Процесс анализа продукции с использованием ИИ в большинстве случаев занимает секунды, а иногда – даже доли секунды, что на конвейерных линиях даёт многократное сокращение времени контроля и прямое влияние на общую производительность предприятия. Опыт крупных производств подтверждает, что цикл проверки сокращается в 2–3 раза по сравнению с ручными операциями, а потери из-за ошибок и человеческого фактора

уменьшаются на 25–40 % [4, с. 61].

Автоматизация также ведёт к снижению финансовых и организационных затрат. Системы ИИ сокращают расходы не только на оплату труда контролёров, но и на последующие процессы устранения дефектов, возвраты, дополнительные проверки и простои оборудования. Компьютерное зрение и анализ больших данных позволяют выявлять закономерности, ведущие к браку, и предпринять меры на ранней стадии – например, откорректировать настройки производственной линии или провести профилактический ремонт.

Нейросети повышают стабильность и воспроизводимость качества, поскольку полностью исключают влияние усталости оператора, субъективности оценки и человеческих ошибок. Такой подход особенно актуален в высокотехнологичных и ответственных отраслях – фармацевтике, авиастроении, пищевой промышленности. Системы непрерывно совершенствуются за счёт самонастройки и регулярного дообучения на новых примерах изображений, что позволяет фиксировать и быстро научиться обнаруживать даже неизвестные ранее дефекты, возникающие при изменениях технологии, сырья или условий производства.

Ещё одно ключевое преимущество – прогнозирование и профилактика проблем. Современные ИИ-системы не только распознают текущие дефекты, но и анализируют параметры оборудования, сырья, производственного процесса для предсказания потенциальных сбоев. Это поддерживает концепцию предиктивного обслуживания: снижение простоев, оптимизация графика ремонта и обслуживание оборудования «по состоянию», а не по расписанию.

Автоматизация контроля, построенная на нейросетях, расширяет прозрачность и управляемость производственных процессов. Все действия системы фиксируются, результаты контроля объективно анализируются и накапливаются в базе данных, что позволяет проводить глубокую и качественную аналитику причин брака, выявлять слабые участки производственной цепочки, внедрять управленческие и технические корректировки. В долгосрочной перспективе это формирует устойчивый цикл улучшения качества и оптимизации расходов [5].

Заключение

Массовое внедрение нейронных сетей и технологий машинного зрения становится стратегическим преимуществом современных производственных предприятий. Организации, интегрировавшие ИИ в контроль качества, получают не только экономию времени и ресурсов, но и новые возможности для повышения надёжности производства и развития цифровой фабрики будущего. Современные системы контроля качества демонстрируют высокую адаптивность – они быстро интегрируются с существующими конвейерными линиями, поддерживают облачные сервисы и умные датчики, способны работать с продукцией разной сложности и размеров.

Стремительное развитие сенсорной базы (камеры высокого разрешения, мультиспектральные сенсоры), совершенствование алгоритмов глубокого обучения, а также снижение стоимости программных и аппаратных решений

делают технологии нейросетей доступными не только для крупнейших заводов, но и для среднего, малого бизнеса, а также для логистических центров и упаковочных цехов. Интеграция с ERP-системами, MES-платформами и управлением складами позволяет организовать контроль качества не только на этапах производства, но и при хранении, перемещении, упаковке и тестировании готовой продукции.

В ближайшие годы ожидается дальнейшее расширение функционала таких систем: они будут способны не только контролировать отдельные изделия, но и отслеживать состояние всей производственной цепочки, динамически оптимизировать процессы, внедрять новые аналитические модули для предиктивного управления и поддержки принятия решений. Такой переход позволит существенно повысить уровень качества, снизить производственные потери и обеспечить конкурентоспособность отечественной промышленности на мировом рынке. Внедрение нейросетевых решений – это инвестирование в устойчивость, гибкость и цифровую зрелость предприятия, что особенно актуально в условиях глобальной конкуренции и растущих требований к продукции.

Список литературы:

1. Сюняев, Р. А. Искусственный интеллект в промышленной автоматизации / Р. А. Сюняев. – М.: Машиностроение, 2022. – 164 с.
2. Григорьев, П. К. Промышленные системы машинного зрения и автоматизации / П. К. Григорьев // Автоматизация в промышленности. – 2023. – №7. – С. 15–23.
3. Malinin S., Gorbachev Y. Automated visual inspection using deep neural networks // Procedia Computer Science. – 2021. – Vol. 194. – P. 101–108.
4. Климов, А. Н. Результаты внедрения нейросетей на машиностроительном заводе / А.Н. Климов // Вестник ИТ и производственных инноваций. – 2024. – №2. – С. 58–64.
5. ГОСТ Р 56518–2015. Системы автоматизации производственных процессов. Термины и определения: официальный текст.

© Садыков Р. Д., 2025

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

магистрант **Садыков Рамис Дамирович**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент **Катасёва Дина Владимировна**,
Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А. Н. Туполева,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В статье раскрываются основные подходы к внедрению адаптивных алгоритмов управления для оптимизации производственных процессов. Рассматриваются методы интеграции программируемых контроллеров, применение адаптивных фильтров и предикативных регуляторов. Приведены примеры успешных внедрений адаптивного программирования для повышения надёжности и эффективности работы автоматизированных систем.

Ключевые слова: адаптивное управление, программирование, ПЛК, производственный процесс, регулятор, моделирование, автоматизация, фильтр, оптимизация.

APPLICATION OF ADAPTIVE ALGORITHMS IN MANUFACTURING PROCESS CONTROL SYSTEMS

Master Student **Sadykov Ramis Damirovich**,
Academic Advisor: PhD in Engineering, Associate Professor
Kataseva Dina Vladimirovna,
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The article outlines main approaches to the implementation of adaptive control algorithms for manufacturing process optimization. Methods of integrating programmable controllers, using adaptive filters and predictive regulators are discussed. Examples of successful implementations in improving reliability and efficiency of automated systems are given.

Keywords: adaptive control, programming, PLC, manufacturing process, regulator, modeling, automation, filter, optimization.

Введение

Управление производственными процессами в современной промышленности требует высокой гибкости и способности быстро реагировать на изменения внешних и внутренних условий.

Рынок вынуждает предприятия часто изменять параметры работы оборудования и адаптироваться к нестабильным или изменяющимся характеристикам сырья, технологической среды, условий эксплуатации. Классические системы управления, построенные на фиксированной логике, демонстрируют приемлемую эффективность только в стабильных режимах работы и часто не справляются с быстрыми колебаниями технологических параметров или сбоев в оборудовании, что ограничивает диапазон их применения [1, с. 4]. Как показывают исследования в области автоматизации, именно ограничения по адаптивности становятся ключевым барьером для резкого увеличения производительности промышленных комплексов.

Использование традиционных ПИД-регуляторов и простых автоматических систем не позволяет своевременно обнаруживать и компенсировать влияние новых внешних факторов – таких как износ оборудования, изменение свойств материалов, переходы на выпуск новых партий или обновление рецептуры продукции. В условиях цифровизации и интенсивного развития информационных технологий на первый план выходят адаптивные программные методы, позволяющие оперативно подстраивать управляющее воздействие в зависимости от текущих характеристик объекта и изменяющихся производственных задач [4, с. 33]. Это позволяет не только избежать аварийных ситуаций, но и существенно повысить ресурс оборудования и бизнес-устойчивость предприятия.

Основные методы

Широкое распространение получили программируемые логические контроллеры (ПЛК), которые дают возможность быстро модернизировать или перенастраивать управляющие алгоритмы без замены аппаратных компонентов – это обеспечивает гибкость и масштабируемость систем, особенно для сложных производств с быстро меняющимися продуктами или требованиями [5, с. 79]. Одним из востребованных инструментов в адаптивном управлении стали адаптивные фильтры, в частности, фильтр Калмана и его модификации, которые эффективно отсеивают шумы и апериодические возмущения в каналах измерения. Это существенно повышает точность оценки состояния объектов управления и позволяет корректировать сигнал управления, минимизируя ошибку даже при наличии сильных внешних воздействий.

Современные подходы выделяют также модельно предиктивное управление (Model Predictive Control, MPC), которое реализует прогнозирование поведения объекта и формирует управляющее воздействие с учётом будущих состояний системы. MPC за несколько шагов вперёд рассчитывает оптимальные значения контролируемых переменных, используя как статические модели объекта, так и реальные онлайн-данные с датчиков [3, с. 44]. Благодаря этому удаётся не только поддерживать необходимые технологические параметры, но и оперативно реагировать на непредвиденные отклонения, заранее предотвращая их последствия.

Внедрение элементов искусственного интеллекта, таких как машинное обучение и нейросетевые методы, позволяет системам управления самостоятельно учиться на исторических данных и даже прогнозировать появление аномалий до их фактического возникновения [3, с. 53].

На рисунке 1 представлена типовая адаптивная система управления: управляемый объект (технологическая установка, машина или линия) оснащается сенсорами, сигнал поступает на ПЛК с интегрированным адаптивным блоком (пакет предиктивных алгоритмов, фильтр Калмана), результат – выдача управляющего сигнала на исполнительный механизм (например, регулятор давления, привода, температурный блок). Контур обратной связи отслеживает эффективность воздействия и корректирует параметры в режиме онлайн.

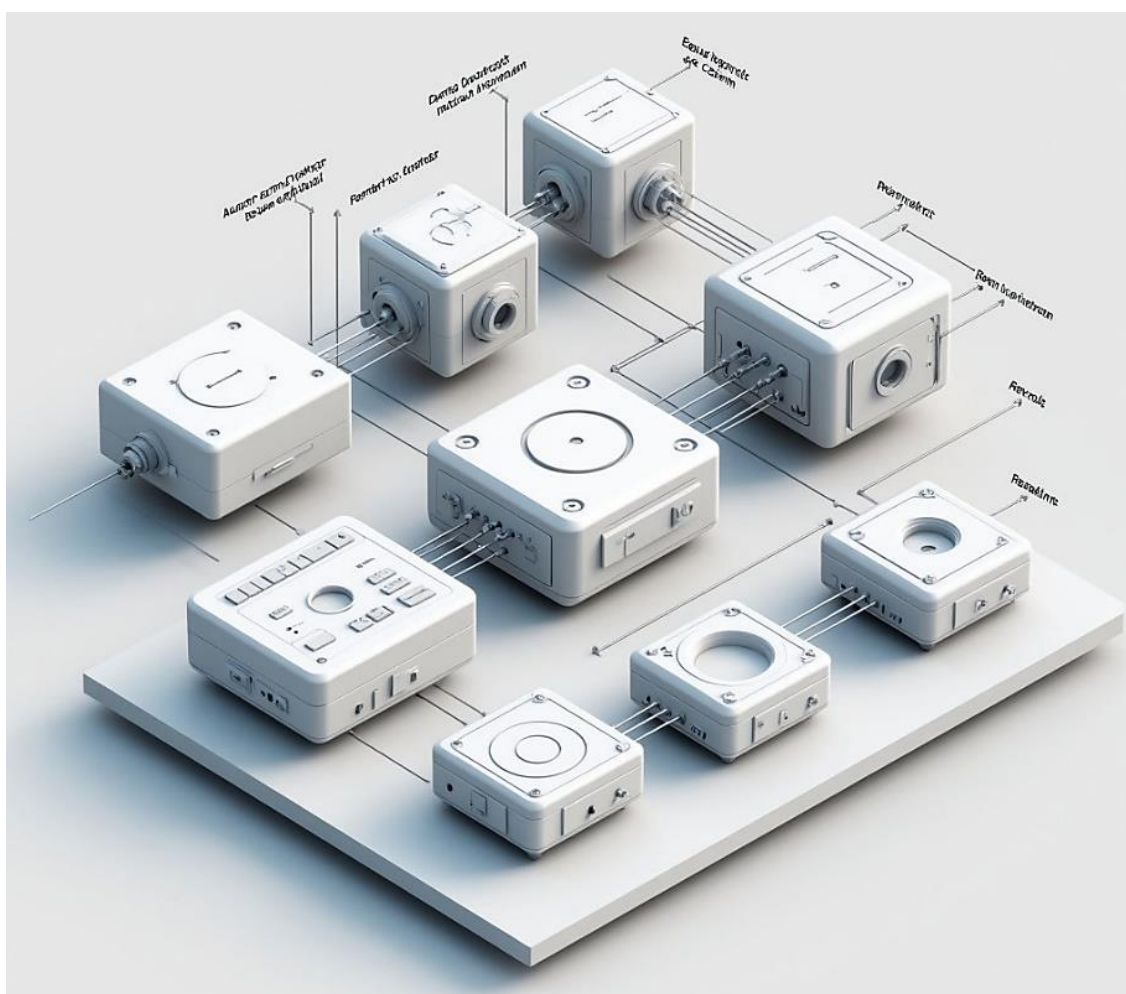


Рисунок 1. Модель адаптивной системы управления

Реализация на практике

В современной промышленности внедрение адаптивных алгоритмов управления невозможно представить без широкого использования SCADA-систем (Supervisory Control and Data Acquisition). Эти комплексные платформы объединяют программное обеспечение, датчики, ПЛК (программируемые логические контроллеры) и исполнительные устройства в

единую сеть, обеспечивая централизованный мониторинг, управление и сбор технологических данных с различных этапов производства. SCADA-системы играют ключевую роль в обеспечении прозрачности процессов, отслеживании всех параметров оборудования в реальном времени и быстрых реакциях на нештатные ситуации. В современных решениях, помимо базовых функций визуализации и диспетчеризации, всё чаще интегрируются специализированные модули для реализации задач адаптивного управления – поддержки изменения коэффициентов регуляторов на лету, работы с алгоритмами машинного обучения и анализа больших данных.

Значительный прогресс отмечается в использовании вычислительных сред и языков программирования высокого уровня, таких как Python с библиотеками TensorFlow и PyTorch, а также специализированных платформ для обработки Big Data [4, с. 77] и интеграции их с SCADA и промышленными ПЛК. Благодаря такому программному обеспечению можно динамически анализировать большие объёмы информации (температура, давление, расход, вибрация, данные о режимах работы), выявлять скрытые закономерности и проводить обучение моделей непосредственно на поступающих от оборудования данных. Автоматизированная настройка и динамическая корректировка ПИД-регуляторов реализуется средствами современных ПЛК, которые не только корректируют параметры на основе внешних изменений, но и способны обучаться от исторических и онлайн-данных, снижая влияние человеческого фактора.

Сильной стороной SCADA является возможность удалённого доступа, интеграция с облачными сервисами, поддержка распределённых систем управления, а также входящий инструментарий для конфигурирования, визуализации и построения трендов – все эти возможности делают систему «живой», гибкой и развивающейся. В последние годы с развитием IoT (Интернета вещей) и технологий искусственного интеллекта SCADA-платформы получают дополнительные возможности по прогнозированию аварий, оптимизации процессов, составлению графиков технического обслуживания на основании предиктивного анализа. Разработки ведущих российских и мировых производителей (MasterSCADA, Systeme Platform и др.) ориентированы на быструю интеграцию с новыми ПЛК и протоколами связи, а также на реализацию обучающих сервисов и SDK для самостоятельной настройки логики адаптационного управления.

Результаты внедрения подобных адаптивных решений очевидны: на промышленных объектах фиксируется заметное снижение простоев оборудования за счёт раннего выявления тенденций к сбою; повышается энергоэффективность – системы автоматически оптимизируют расход ресурсов, что особенно заметно на энергоёмких этапах производства; сокращаются затраты на эксплуатацию и обслуживание, поскольку переход к предиктивному обслуживанию позволяет планировать ремонты по фактическому состоянию оборудования, а не по регламенту [3, с. 45]. Гибкость адаптивных алгоритмов

обеспечивает стабильную работу автоматических линий даже при частых изменениях ассортимента или свойств выпускаемой продукции, что особенно актуально для высокотехнологичных и мультипродуктовых предприятий.

Пример применения

На практике внедрение адаптивных алгоритмов управления широко апробировано во многих отраслях, от машиностроения до химической и энергетической промышленности. Ярким примером может служить проект по модернизации линии термической обработки на машиностроительном предприятии. До внедрения автоматизации поддержание необходимой температуры часто выполнялось по фиксированным программам или вручную, что приводило к перерасходу энергии, нестабильности режима и, как следствие, к браку продукции. После установки SCADA-системы с модулем адаптивного управления и интеграции продвинутого ПИД-регулятора, дополняемого фильтром Калмана для работы с «шумными» датчиками, предприятие добилось существенного повышения точности поддержания температуры и предсказуемости тепловых процессов. Адаптация параметров регуляторов происходила практически в реальном времени, с учётом отклонения свойств материала, погодных условий или технического состояния оборудования [4, с. 298].

В результате расход энергоресурсов снизился на 17 %, случаев выхода параметров за технологические допуски стало существенно меньше, сократилось число внеплановых остановок печей и связанных производственных потерь. Аналогичные решения сегодня внедряются и на других этапах производства – например, при смешивании компонентов, розливе жидкостей, сборке сложных узлов. Почти всегда результаты сопровождались не только повышением стабильности и уменьшением числа брака, но и ростом ремонтпригодности, потому что система чётко фиксирует моменты нестабильности и позволяет целенаправленно устранять «узкие места».

Заключение

Таким образом, развитие SCADA-систем и интеграция модулей адаптивного управления становятся важнейшей составляющей перехода к цифровой индустрии и промышленности 4.0. Адаптивные алгоритмы доказали свою эффективность как на уровне отдельного регулятора, так и в составе комплексных автоматизированных комплексов управления как мелкими, так и крупнейшими технологическими процессами.

Эти системы уже сегодня обеспечивают более высокий уровень гибкости, надёжности и технологической зрелости предприятия, существенно повышая прозрачность производственных процессов и облегчая принятие управленческих решений. Развитие цифровых технологий, появление SCADA-решений, ориентированных на киберфизические и IoT-системы, открывают новые возможности для сбора, анализа и обработки данных, что стимулирует дальнейшее совершенствование методов адаптивного управления.

Ожидается, что в ближайшие годы подобные системы будут массово

интегрироваться в абсолютно новые сферы – от интеллектуального распределения энергии до гибких производственных кластеров, обслуживания роботизированных линий и «умных» логистических комплексов.

Всё это позволит промышленности и смежным отраслям выйти на принципиально новый уровень предиктивности, экономической эффективности и технической безопасности работы.

Список литературы:

1. Толоконников, И. А. Современные методы автоматизации производств / И.А. Толоконников. – СПб: Лань, 2022. – 204 с.
2. Astrom, K. J. Adaptive Control / K. J. Astrom, B. Wittenmark. – 2nd ed. – Mineola: Dover Publications, 2013. – 547 p.
3. Латыпов, П. Н. Адаптивное управление в программно-аппаратных комплексах / П. Н. Латыпов // Автоматизация и управление. – 2023. – №1. – С. 42–51.
4. Иванова, Ю. С. Пример внедрения адаптивных регуляторов на машиностроительном предприятии / Ю. С. Иванова // Системы автоматизации. – 2024. – №2. – С. 294–301.
5. ГОСТ Р 56425–2021. Технические средства и системы автоматизации. Термины и определения: официальный текст.

© Садыков Р. Д., 2025

ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТОВ И ГРАФИКОВ ОБХОДОВ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ДРОНОВ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

студент **Матижева Анна Петровна**,
канд. техн. наук, доцент **Сандаков Виталий Дмитриевич**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена современному подходу к обслуживанию линий электропередачи (ЛЭП) с использованием беспилотных летательных аппаратов (дронов) и искусственного интеллекта (ИИ). Рассматривается переход от традиционных, трудоемких и опасных методов обхода к интеллектуальной системе мониторинга. Описывается, как ИИ анализирует данные для оптимизации маршрутов и графиков полетов, а также автоматически выявляет дефекты в реальном времени. Следует вывод, что симбиоз технологий не только автоматизирует процесс, но и позволяет перейти от реактивного к предиктивному обслуживанию, значительно повышая надежность и экономическую эффективность энергоснабжения.

Ключевые слова: обслуживание ЛЭП, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), дроны, искусственный интеллект (ИИ), компьютерное зрение, оптимизация маршрутов, мониторинг электросетей.

OPTIMIZATION OF ROUTES AND SCHEDULES FOR BYPASSING LINEAR ELECTRIC NETWORKS USING DROPS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Student **Matizheva Anna Petrovna**,
PhD in Engineering, Associate Professor **Sandakov Vitaly Dmitrievich**,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to a modern approach to the maintenance of power transmission lines (PTL) using unmanned aerial vehicles (drones) and artificial intelligence (AI). The transition from traditional, time-consuming and dangerous methods of bypassing to an intelligent monitoring system is considered. It describes how AI analyzes data to optimize routes and flight schedules, and automatically detects defects in real time. It is concluded that the symbiosis of technologies not only automates the process, but also allows for a transition from reactive to predictive maintenance, significantly increasing the reliability and cost-effectiveness of energy supply.

Keywords: transmission line maintenance, unmanned aerial vehicles (UAVs), drones, artificial intelligence (AI), computer vision, route optimization, and power grid monitoring.

Эволюция технологий диагностики и обслуживания линий электропередачи знаменует собой фундаментальный сдвиг парадигмы в управлении энергетической инфраструктурой – переход от эпохи, когда надежность энергосистемы всецело зависела от зоркого глаза, физической выносливости и накопленного опыта электромонтера, к новой цифровой реальности, где комплексные данные, предиктивные алгоритмы и автономные системы становятся главными гарантами стабильности. Этот технологический прорыв выходит далеко за рамки простой замены одного инструмента другим; он представляет собой коренное преобразование самой системы обслуживания критической инфраструктуры, переводя ее из реактивного состояния постоянного «тушения пожаров» в проактивный режим интеллектуального управления жизненным циклом активов.

Традиционные методы, десятилетиями бывшие отраслевым стандартом, сегодня демонстрируют свою системную ограниченность. Они были неразрывно сопряжены с неизбежным риском для жизни и здоровья персонала, вынужденного работать в непосредственной близости от токоведущих частей под высоким напряжением или преодолевать десятки километров по бездорожью в любых погодных условиях [1]. Колоссальные трудозатраты, при которых до 70 % рабочего времени бригады уходило не на непосредственный осмотр, а на логистику и перемещение, делали процесс чрезвычайно дорогим и малоэффективным. Но, пожалуй, самым уязвимым местом традиционного подхода была неизбежная субъективность человеческого восприятия: усталость, невнимательность, недостаточная квалификация или просто физическая невозможность разглядеть начинающийся дефект с расстояния в десятки метров с земли. Эти методы, некогда бывшие единственно возможными, сегодня уступают место высокоточному, безопасному и основанному на данных подходу, который формирует новую экосистему управления энергосетями.

Сердцем этой трансформации стал симбиоз беспилотных авиационных систем (БПЛА) и искусственного интеллекта (ИИ). Современные промышленные дроны, такие как «DJI Matrice 350 RTK» или специализированные модели для обследования труднодоступных пространств вроде «Flyability Elios 3», превратились из простых летающих камер в сложные диагностические платформы [2]. Они оснащаются целым комплексом сенсоров: камерами видимого спектра сверхвысокого разрешения (до 45 Мп), тепловизорами для обнаружения перегрева контактов и элементов соединения проводов, лидарами для построения точных 3D-моделей охранных зон и выявления опасного сближения крон деревьев с проводами, а также УФ-камерами для регистрации короны – частичных разрядов на изоляторах, которые являются предвестниками их скорого выхода из строя. Эти летающие лаборатории научились не просто собирать гигабайты и даже терабайты

визуальной информации за один облет участка линии, но и в тесном тандеме с системами ИИ превращать этот гигантский массив сырых данных в структурированные, контекстуальные и, что самое главное, действенные знания [3].

Ключевое преимущество этой формирующейся цифровой экосистемы – ее врожденная способность к постоянному самообучению, адаптации и прогнозированию. Мы уже являемся свидетелями того, как современные системы на основе машинного обучения не просто автоматически строят оптимальные маршруты полетов, но и динамически их адаптируют, учитывая многолетнюю историю отказов на конкретных участках, реальные погодные условия (например, повышенную влажность или ветровую нагрузку), тип местности и сезонные риски, такие как падение деревьев или обледенение. Алгоритмы компьютерного зрения, обученные на обширных датасетах, содержащих сотни тысяч размеченных изображений дефектного и исправного оборудования, достигли уровня точности, превышающего человеческий, в идентификации более 50 видов повреждений: от обрыва отдельных проволок в несущем тросе («броне») и микротрещин в тарельчатых изоляторах до начальной стадии коррозии на узле крепления опоры и опасного провисания проводов.

Сравнительный анализ методов обслуживания ЛЭП был проведен в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ методов обслуживания ЛЭП

Критерий оценки	Традиционный метод (пешие обходы, вертолеты)	Комплексный метод (дроны + ИИ)
Безопасность персонала	Высокий риск: работа на высоте, под напряжением, в труднодоступной местности	Минимальный риск: дистанционный осмотр, персонал не контактирует с ЛЭП
Скорость обследования	5-10 км в день (пеший обход); 50-100 км в час (вертолет)	20-40 км в час (дрон) с одновременным сбором данных
Детализация и точность	Субъективная оценка, зависимость от человеческого фактора, пропуск мелких дефектов	Объективные данные в высоком разрешении, автоматическое распознавание дефектов до 1 мм
Глубина анализа данных	Визуальный осмотр, фотофиксация Без систематизации	Многоспектральный анализ (видимый спектр, ТВ-излучение)

Критерий оценки	Традиционный метод (пешие обходы, вертолеты)	Комплексный метод (дроны + ИИ)
		УФ-люминесценция, 3D-моделирование)
Стоимость обследования 1 км ЛЭП	300-500 \$ (пеший обход); 800-1200 \$ (вертолетный облет)	150-300 \$ (с учетом амортизации оборудования и ПО)
Время обработки данных	От нескольких дней до недель (ручной анализ)	От нескольких часов до минут (автоматизированный анализ)
Возможности прогнозирования	Ограниченные, на основе опыта персонала	Предиктивные модели на основе анализа больших данных и машинного обучения
Влияние погодных условий	Сильное ограничение работ при плохой погоде	Возможность работы в широком диапазоне условий (кроме экстремальных)
Масштабируемость	Ограничена численностью персонала и техники	Высокая, возможность одновременного использования множества БПЛА

Однако настоящий прорыв, кардинально меняющий экономику обслуживания сетей, заключается в переходе к предиктивной аналитике. Накопленные за несколько циклов мониторинга данные позволяют системам ИИ выявлять сложные, нелинейные корреляции и тенденции, абсолютно невидимые для человеческого анализа. К примеру, алгоритмы могут установить, что скорость эрозии полимерных изоляторов на конкретном участке трассы напрямую коррелирует не только с общей запыленностью воздуха, но и с определенными направлениями ветра, приносящего агрессивные выбросы от удаленного промышленного предприятия, или с циклами замерзания и оттаивания. Такой глубинный анализ позволяет энергокомпании не просто фиксировать уже появившуюся трещину, а заранее, за месяцы или даже кварталы до потенциального катастрофического отказа, планировать и бюджетировать упреждающую замену целой партии оборудования. Это переводит техническое обслуживание из затратного и хаотичного режима

«латания дыр» и «реагирования на аварию» в стратегический, плановый и финансово оптимизированный режим «управления жизненным циклом актива».

Одним из крайне перспективных и ранее недостаточно освещавшихся направлений является использование этой же технологии для комплексного мониторинга соблюдения охранных зон ЛЭП. Мощные алгоритмы компьютерного зрения могут теперь автоматически детектировать, классифицировать и отслеживать в динамике любую несанкционированную деятельность вблизи линий электропередачи: будь то начало незаконного строительства, работа карьерной или сельскохозяйственной техники, складирование горючих материалов, несанкционированные земляные работы или вырубка леса. Это позволяет предотвращать до 80 % аварий, вызванных человеческим фактором, на самой ранней стадии, автоматически генерируя и отправляя предписания землепользователям, уведомления в контролирующие органы и службы безопасности, что кардинально повышает не только надежность, но и безопасность энергообъектов для населения.

Помимо этого, интеграция данных аэрофотосъемки с геоинформационными системами (GIS) и цифровыми двойниками распределительных сетей открывает новые горизонты для планирования и моделирования. Инженеры теперь могут в виртуальной среде, с высочайшей точностью, прорабатывать варианты модернизации существующих линий, трассировки новых, оценивать воздействие будущих строительных проектов на инфраструктуру и моделировать поведение сети при различных внешних воздействиях, таких как ураганы или обледенения [4].

Безусловно, широкомасштабное внедрение таких инновационных решений сопряжено с комплексом серьезных вызовов. Они включают в себя необходимость значительных первоначальных капитальных инвестиций не только в сами БПЛА и датчики, но и в мощную вычислительную инфраструктуру, программное обеспечение и защищенные каналы передачи данных; глубокую переподготовку и повышение квалификации персонала, которому предстоит работать в новой цифровой среде; а также решение нормативно-правовых вопросов, связанных с полетами БПЛА над критической инфраструктурой и использованием данных аэрофотосъемки.

Однако совокупный экономический эффект и стратегические выгоды, подтвержденные уже рядом успешных пилотных проектов в компаниях, таких как «Россети» и «ФСК ЕЭС», становятся неоспоримыми. Этот эффект складывается из мультипликативной комбинации прямого сокращения операционных затрат (до 60 % на замену вертолетных облетов и высотных работ промышленных альпинистов), кардинального снижения коммерческих потерь от недоотпуска электроэнергии потребителям из-за аварийных отключений, оптимального планирования ремонтного фонда и, что, возможно, является самым ценным, – неуклонного роста надежности, отказоустойчивости и общей цифровой зрелости всей национальной энергосистемы [5].

Таким образом, обозримое будущее технического обслуживания и мониторинга ЛЭП – это уже не просто точечная оптимизация, а создание целостной, централизованной, самообучающейся и постоянно

эволюционирующей цифровой экосистемы. В этой экосистеме беспилотники выполняют роль ее высокоточных периферийных сенсоров и «глаз», а искусственный интеллект – роль аналитического центра, ее «мозга», непрерывно обрабатывающего потоки информации, выявляющего скрытые закономерности, прогнозирующего риски и генерирующего оптимальные управляющие решения. Конечная цель этой сложной, но чрезвычайно эффективной системы – обеспечение бесперебойного, качественного и доступного энергоснабжения, которое является кровеносной системой современной цифровой экономики и фундаментальной основой комфорта и устойчивого развития общества в XXI веке. Это переход от обслуживания по регламенту к обслуживанию по состоянию и от управления активами к управлению надежностью как сервисом.

Список литературы:

1. Безбожнов, О. Н. Интеллектуальные сети энергоснабжения: мониторинг качества электроэнергии / О. Н. Безбожнов, Д. И. Чадаев // NBI-technologies. – 2022. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnye-seti-energосnabzheniya-monitoring-kachestva-elektroenergii> (дата обращения: 25.11.2025). – Текст: электронный.
2. Урумбаева, О. Б. Концепция интеллектуального управления энергосетью / О. Б. Урумбаева, Т. А. Шалаев, О. М. Шиккульская // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2020. – № 3 (33). – URL: [cyberleninka.ru](https://cyberleninka.ru/article/n/konceptsiya-intellektualnogo-upravleniya-energосetью) (дата обращения: 25.11.2025). – Текст: электронный.
3. Нигъматуллина, А. В. Мониторинг и анализ качества нагрузки электросетей при помощи искусственного интеллекта / А. В. Нигъматуллина // Современные технологии: проблемы инновационного развития и внедрения результатов: сборник статей XV Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 05 марта 2024 года. – Петрозаводск: Новая Наука, 2024. – С. 49–52.
4. Данилочкина, Н. Г. Оптимизация логистических маршрутов посредством применения технологий искусственного интеллекта / Н. Г. Данилочкина, А. А. Лысенко // Научные труды Вольного экономического общества России. – 2024. – Т. 246, № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-logisticheskikh-marshrutov-posredstvom-primeneniya-tehnologiy-iskusstvennogo-intellekta> (дата обращения: 25.11.2025). – Текст: электронный.
5. Мясоедова, Л. А. Оценка эффективности использования беспилотных авиационных систем при мониторинге линий электропередачи / Л. А. Мясоедова, А. Е. Козырева // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2022. – № 99. – URL: [cyberleninka.ru](https://cyberleninka.ru/article/n/ocenka-effektivnosti-ispolzovaniya-bespilotnykh-aviatsionnykh-sistem-pri-monitoringe-linij-elektroпередачи) (дата обращения: 25.11.2025). – Текст: электронный.

© Матижева А. П., Сандаков В. Д., 2025

ПЕРЕХОД К УНИВЕРСАЛЬНОЙ МЕТОДИКЕ ТЕПЛОВОГО РАСЧЁТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СУШКИ НА БДМ И КДМ

аспирант **Климаш Никита Андреевич**,
науч. руководитель: доктор техн. наук, профессор **Бойков Лев Михайлович**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В работе, на основе новой методики тепловых расчётов, сравниваются методы двухстороннего и одностороннего подвода теплоты к сушильным цилиндрам на БДМ и КДМ. Установлено, что схема одностороннего подвода теплоты повышает эффективность процесса сушки на 15 %. По разработанной методике были рассчитаны и модернизированы бумагоделательные и картоноделательные машины на ряде производств.

Ключевые слова: бумагоделательные и картоноделательные машины, сушильные установки, пароконденсатные системы, кинетика сушки.

TRANSITION TO A UNIVERSAL THERMAL CALCULATION METHODOLOGY FOR OPTIMIZING THE DRYING PROCESS ON BDM AND KDM

PhD Student **Klimash Nikita Andreevich**,
Academic Advisor: Doctor of Technology, Professor **Boykov Lev Mikhailovich**,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper compares the methods of bilateral and unilateral heat supply to drying cylinders on paper-making and cardboard-making machines (BDM and KDM) based on a new thermal calculation methodology. It was established that the unilateral heat supply scheme increases the efficiency of the drying process by 15%. Using the developed methodology, paper-making and cardboard-making machines were calculated and modernized at several production facilities.

Keywords: paper-making and cardboard-making machines, drying systems, steam-condensate systems, drying kinetics.

Сейчас на многих российских предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности всё ещё работают бумагоделательные и картоноделательные машины (БДМ и КДМ) небольшой и средней мощности, которые были сконструированы и введены в эксплуатацию в прошлом веке.

С того времени вследствие технологического прогресса и научных

открытий были представлены новые улучшенные схемы пароконденсатных систем (ПКС), агрегатов и узлов, однако устаревшие БДМ и КДМ по-прежнему продолжают выполнять свою работу в неизменном или слегка изменённом виде.

Для данных машин характерен существенный перерасход пара и тепловой энергии (до 40 %), вследствие:

- использования несовершенных схем пароконденсатных систем (ПКС);
- использования агрегатов и узлов устаревшей конструкции;
- износа и выхода из строя отдельных узлов и агрегатов.

Данная проблема приводит к значительной недовыработке выпускаемой продукции и снижению рентабельности производства [1].

По причине роста цен на энергоносители, усиления конкуренции, новых государственных требований [2, 3] производства постепенно начинают задаваться вопросом модернизации оборудования.

Наибольший экономический эффект может оказать изменение схемы ПКС на БДМ, по причине того, что в сушильной части расходуется 69 – 72 % всей расходуемой на машине тепловой энергии (рис. 1).

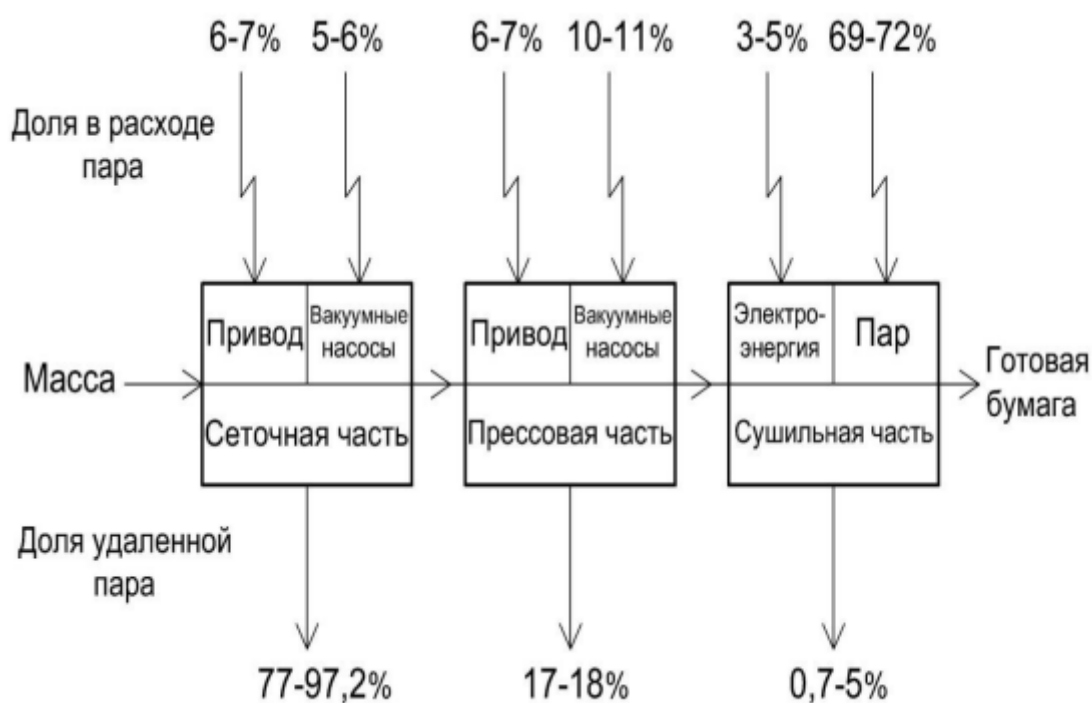


Рисунок 1. Распределение расхода энергии на современной БДМ [1]

Тепловые расчёты в ранних машинах рассчитывались по методологиям А. В. Лыкова [4–7] и В. В. Красникова [8], однако точность расчётов оставляла желать лучшего. Данными методологиями невозможно определить точную тепловую эффективность и преимущества одного способа подвода теплоты перед другим, а также невозможно найти интенсивность сушки для каждого периода процесса сушки.

Для расчёта современных контактных сушильных установок малой и средней мощности используется методология, основанная на работах

П. А. Жучкова и А. П. Бельского [9–12]. Однако и она не подходит под современные требования. В расчёте БДМ, работающих с отключенными по пару и конденсату цилиндрами, полученные значения производительности отличаются от фактических значений производительности до 40 %.

С целью уточнения расчётов и модернизации БДМ и КДМ Л. М. Бойковым была предложена универсальная методика теплового расчёта многоцилиндровых контактно-конвективных сушильных установок [1, 13–14], устраняющая основные недостатки ранее существовавших подходов. Данная методология позволила определить производительность сушильной установки на основе количества испаряемой влаги в каждом сушильном цикле «сушильный цилиндр – свободный пробег полотна между цилиндрами».

В дальнейшем методология была усовершенствована, и это позволило научно обосновать и разработать схему одностороннего подвода теплоты к влажному полотну.

По методологии Л. М. Бойкова были проведены сравнительные расчёты односторонней и двухсторонней схемы подвода теплоты к полотну.

Результаты расчётов:

1. Количество испаряемой влаги при двухстороннем подводе теплоты к полотну на каждом цилиндре составляет 52,5 %, а на участке межцилиндрового пробега полотна – 47,5 %.

2. Количество испаряемой влаги при одностороннем подводе теплоты к полотну составляет: 35,5 % – на цилиндре, на участке пробега полотна между цилиндрами – 41 %, через вакуумный вал – 23,5 %.

Ниже представлены сравнения схем и тепловых графиков:

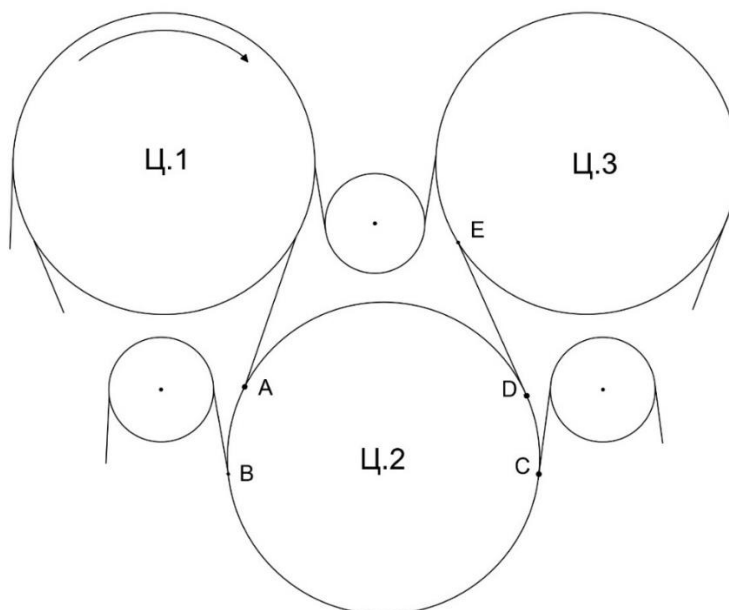


Рисунок 2. Двухсторонняя схема подвода теплоты к полотну [1].

A, B, C, D, E – характерные точки процесса сушки полотна;

Ц. 1, 2, 3 – цилиндры 1, 2, 3.

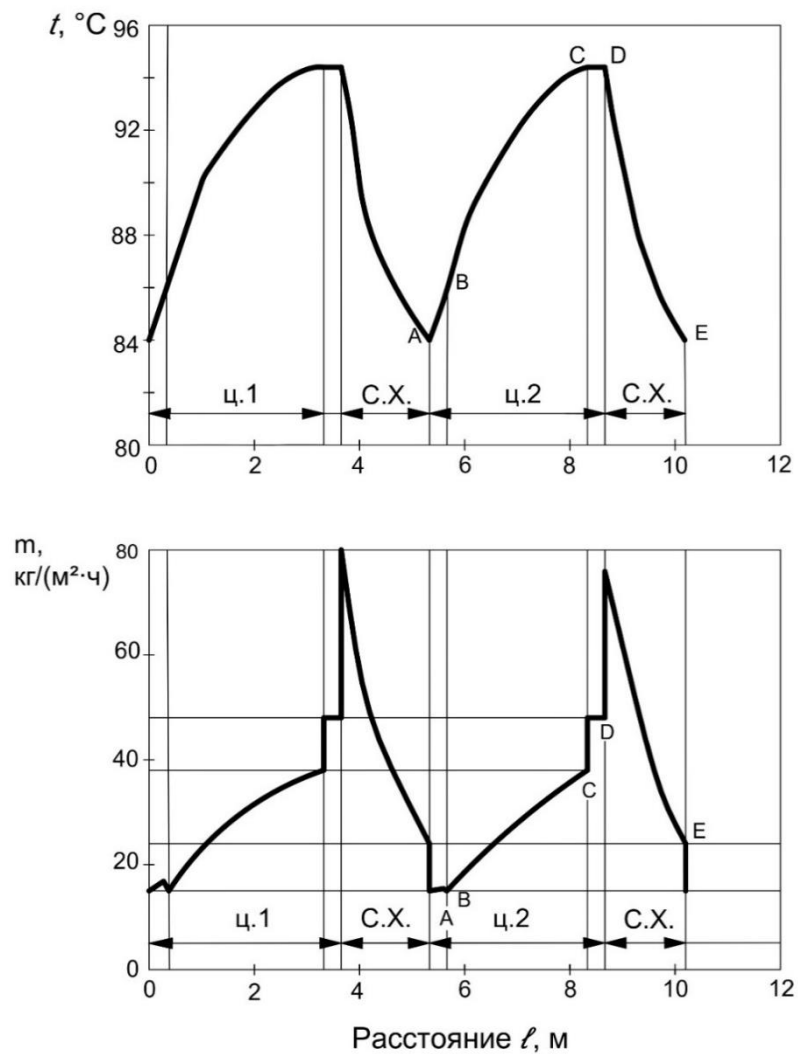


Рисунок 3. Изменение температуры (t , $^{\circ}\text{C}$) и интенсивность сушки полотна при двухсторонней схеме подвода теплоты [1]

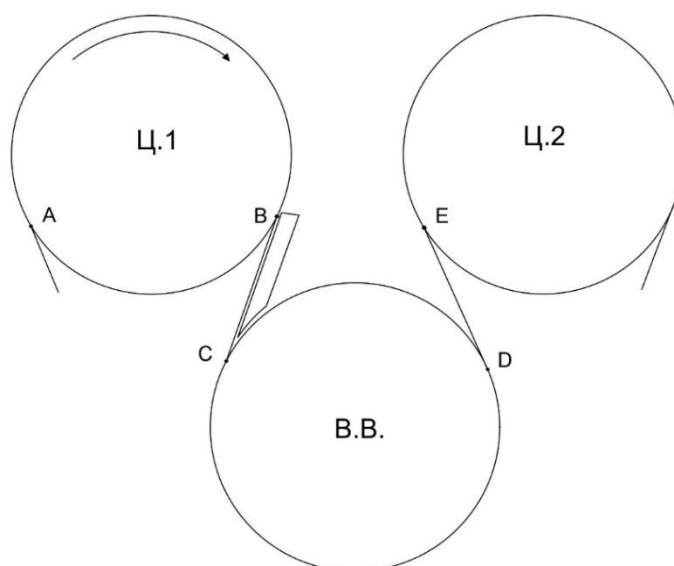


Рисунок 4. Односторонняя схема подвода теплоты к полотну [1]
 A, B, C, D, E – характерные точки процесса сушки полотна;
 Ц. 1, 2 – цилиндры 1 и 2; В. В. – вакуумный вал

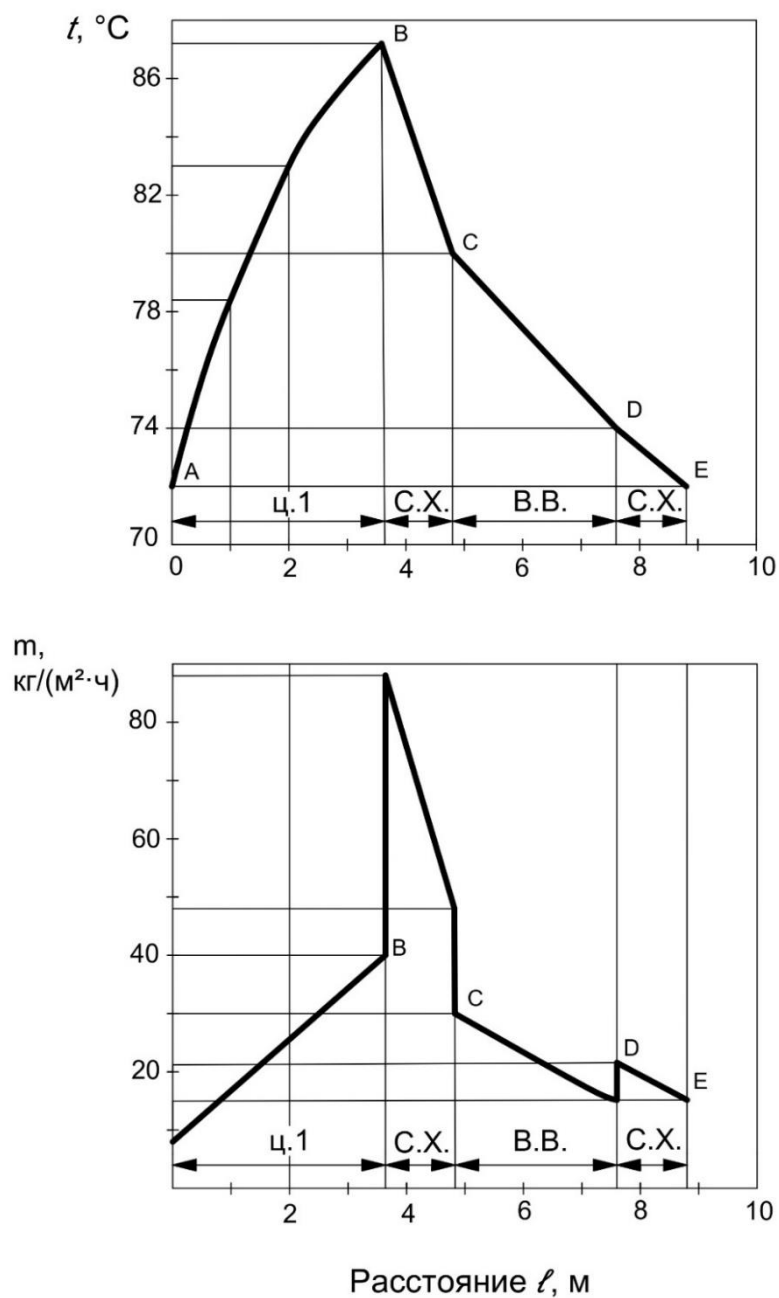


Рисунок 5. Изменение температуры (t , °C) и интенсивность сушки полотна при односторонней схеме подвода теплоты [1]

В результате сравнения графиков и тепловых расчётов стало известно, что при схеме одностороннего подвода теплоты сушильный процесс на 15 % более эффективен в сравнении с схемой двухстороннего подвода теплоты.

Действующие БДМ с двухсторонней схемой подвода теплоты возможно перевести на одностороннюю схему, отключив подачу пара и конденсата на цилиндры нижнего яруса. Для улучшения качества бумажного или картонного полотна необходимо чередование подачи теплоты на цилиндры (чередовать подвод пара то к нижним, то к верхним цилиндрам).

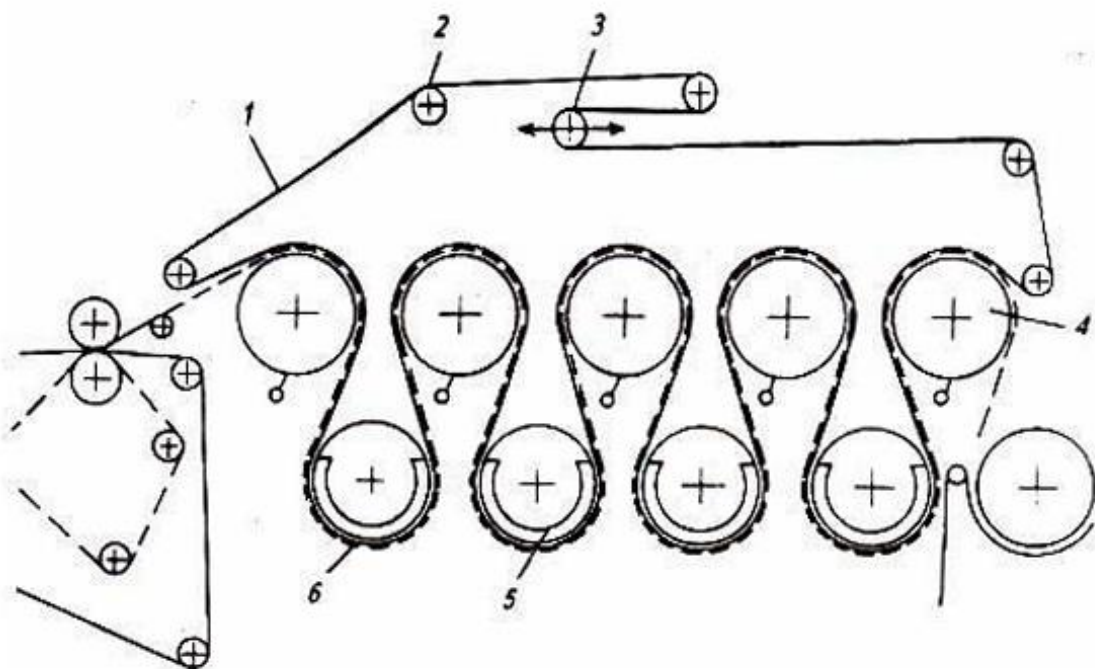


Рисунок 6. Схема проводки бумажного полотна по сушильной части БДМ с использованием вакуумных валов [1]:

- 1 – сушильная сетка; 2 – направляющий валик; 3 – валик для натяжения сетки; 4 – сушильный цилиндр; 5 – вал с вакуумной камерой;
6 – бумажное полотно

Перевод схемы ПКС с двухстороннего на односторонний подвод теплоты успешно апробирован на ряде производств [1]:

- БДМ-8, АО «Кондопожский ЦБК» г. Кондопога, где отключено 19 из 50 цилиндров (42%).
- БДМ-4, 7, 9, АО «Кондопожский ЦБК», г. Кондопога, где отключено до 30% цилиндров.
- БДМ-4, АО «Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат», г. Архангельск.
- КДМ, АО «Алексинская БКФ», г. Алексин.
- КДМ, ОАО «Слонимский КБЗ «Альбертин», г. Слоним.
- Пресспат, ООО «РК-Гранд» г. Питкяранта.

Список литературы:

1. Бойков, Л. М. Повышение эффективности сушки путем модернизации пароконденсатных систем бумагоделательных, картоноделательных машин и гофроагрегатов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Л. М. Бойков. – СПб.: СПб ГТУ РП. 2015. – 575 с.
2. Правительство Российской Федерации. Распоряжение от 13 ноября 2009 года № 1716-р Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. – Москва: ЭКСМО, 2009.
3. Российская Федерация. Указ Президента Российской Федерации. О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики [№ 889 от 4 июня 2008 года].
4. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
5. Лыков, А. В. Тепломассообмен. Справочник / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 479 с.
6. Лыков, А. В. Теория тепло - и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.
7. Лыков, А. В. Тепло - и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 464 с.
8. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. – М.: Энергия, 1973. – 288 с.
9. Жучков, П. А. Тепловые процессы в целлюлозно-бумажном производстве / П. А. Жучков. – М.: Лесная промышленность, 1978. – 407 с.
10. Жучков, П. А. Тепловой и гидравлический режимы бумагоделательных и картоноделательных машин / П. А. Жучков, В. И. Саунин. – М.: Лесная промышленность, 1972. – 152 с.
11. Бельский, А. П. Теоретические основы процессов контактно-конвективной сушки бумаги: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. П. Бельский. – Л.: ЛТИЦБП, 1991. – 30 с.
12. Жучков, П. А. Исследование эффективности различных методов интенсификации тепловых процессов в сушильных установках для сушки тонких и дисперсных материалов в целлюлозно-бумажном производстве: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / П. А. Жучков. – М.: МЭИ, 1970. – 62 с.
13. Бойков, Л. М. Совершенствование процессов контактно-конвективной сушки картона и бумаги: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Л. М. Бойков. – СПб.: СПбГТУРП, 2001. – 32 с.
14. Бойков, Л. М. Универсальная методика расчета контактных сушильных установок / Л. М. Бойков // Химия и технология целлюлозы и полуцеллюлозы: межвуз. сб. науч. тр. – Л.: ЛТА, 1989. – С. 28–32.

©Климаш Н. А., 2025

ИНТЕГРАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УПРАВЛЕНИЕ ЧПУ-СТАНКАМИ НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

студент **Шатохин Александр Александрович**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент **Ремизова Ирина Викторовна**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена исследованию роли интеграции информационных технологий в управление металлообрабатывающими станками с числовым программным управлением на предприятиях металлургической отрасли. Рассматриваются современные подходы к объединению ЧПУ-оборудования с CAD/CAM, MES и ERP-системами, анализируются проблемы внедрения, вопросы цифровой безопасности, а также перспективы развития, включая цифровые двойники, искусственный интеллект, предиктивное обслуживание и удалённый контроль производства.

Ключевые слова: ЧПУ, цифровизация производства, MES, CAD/CAM, ERP, металлургия, информационные технологии, промышленная автоматизация.

INTEGRATION OF INFORMATION TECHNOLOGIES INTO THE CONTROL OF CNC MACHINES IN METALLURGIC PRODUCTION

Student **Shatokhin Alexander Alexandrovich**,
Academic Advisor: PhD in Technology, Associate Professor
Remizova Irina Viktorovna,
Saint Petersburg State Technical University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Power Engineering,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper is devoted to the study of the role of integration of information technologies in the control of metalworking machines with numerical control at the enterprises of the metallurgical industry. Modern approaches to the integration of CNC equipment with CAD/CAM, MES and ERP systems are considered, the problems of implementation, digital security issues, as well as development prospects, including digital twins, artificial intellect, predictive maintenance and remote control are analyzed Production.

Keywords: CNC, digitalization of production, MES, CAD/CAM, ERP, metallurgy, information technology, industrial automation.

В эпоху цифровой трансформации и прогресса в сфере IT внедрение информационных технологий в системы управления оборудованием, в

частности, в станки с ЧПУ (числовым программным управлением), приобретает первостепенное значение. В металлургии, где ключевыми факторами являются высокая точность, безотказность и повторяемость операций, использование станков с ЧПУ является критически важным элементом стратегии автоматизации производства.

В современном мире, характеризующемся распространением цифровых технологий, интеграция IT-решений в управление промышленным оборудованием, таком как металлорежущие станки с ЧПУ, становится все более актуальной. В контексте металлургической промышленности, где к точности, надежности и стабильности технологических операций предъявляются повышенные требования, применение станков с ЧПУ является необходимым условием для успешной автоматизации [1].

В настоящее время металлургические заводы используют разнообразное оборудование с числовым программным управлением, в том числе токарные, токарно-карусельные, горизонтально-расточные станки и установки для глубокого сверления. Данные типы станков позволяют автоматизировать процесс обработки крупных металлических деталей с высокой степенью точности и повторяемости, а также сократить влияние ошибок, связанных с человеческим фактором. При этом результативность работы этих станков напрямую зависит от того, насколько они интегрированы в информационные системы управления производством [2].

Одним из ключевых направлений автоматизации в данном контексте является связка станков с ЧПУ с более высокоуровневыми информационными системами: CAD/CAM (Computer-Aided Design/computer-aided manufacturing) комплексами, MES (Manufacturing Execution System) и ERP (Enterprise Resource Planning). Интеграция CAD/CAM-сред позволяет ускорить цикл подготовки управляющих программ, снизить количество ошибок при передаче данных, а также внедрить цифровую документацию и цифровые двойники изделий. MES-системы обеспечивают планирование и контроль исполнения заданий, а также сбор и анализ производственных данных в реальном времени. Через ERP-системы ЧПУ-станки становятся частью общей производственной логистики, где их загрузка, износ и производительность учитываются при принятии управленческих решений [3].

Внедрение интеграционных решений, несмотря на их перспективность, сопряжено с определенными трудностями. К ним относятся технические и программные противоречия между устройствами различных производителей и поколений, ограниченные функциональные возможности устаревших контроллеров, нехватка опытных специалистов для обслуживания и конфигурирования современных IT-систем, а также значительные финансовые вложения, необходимые для модернизации. Помимо прочего, отсутствие единой централизованной системы управления в некоторых ситуациях влечет за собой разрозненность данных и, как следствие, уменьшение результативности автоматизации [4].

Вопросы безопасности также имеют первостепенное значение. Интеграция станков с числовым программным управлением (ЧПУ) в корпоративную сеть поднимает планку угроз кибербезопасности, что может

затронуть не только операционное управление оборудованием, но и итоговые характеристики выпускаемой продукции. В связи с этим становится необходимым акцентирование внимания на создании безопасной IT-среды и применении промышленных протоколов, включающих механизмы шифрования и идентификации пользователей. Невзирая на указанные препятствия, перспективы развития систем управления металлообрабатывающими станками с ЧПУ в значительной степени зависят от расширения применения информационных технологий в производственном процессе.

В качестве наиболее многообещающих векторов развития выделяются внедрение цифровых моделей-двойников оборудования, применение машинного обучения и искусственного интеллекта для усовершенствования параметров обработки и выявления дефектов, а также внедрение стратегий прогнозируемого технического обслуживания, которые способствуют сокращению времени простоя оборудования и продлению интервалов между ремонтами.

В обозримом будущем прогнозируется усиление тенденции к дистанционному мониторингу и управлению производственными процессами. Станки с числовым программным управлением, интегрированные с облачными сервисами, будут способны транслировать телеметрические данные в режиме реального времени, предоставляя операторам и технологам возможность анализировать функционирование оборудования без физического присутствия на производственной площадке. Это становится особенно важным в контексте кадрового дефицита и необходимости повышения адаптивности производства.

Важнейшим элементом успешной цифровизации металлургической отрасли является формирование интегрированной системы данных. Она должна гарантировать бесперебойный обмен информацией между этапами проектирования, подготовки производства и непосредственно производственным процессом. Фактически это подразумевает отказ от изолированных рабочих мест в пользу комплексной архитектуры, в которой изделия, управляющие программы и технологические параметры сопровождаются унифицированным информационным пакетом на протяжении всего жизненного цикла.

Этот метод способствует уменьшению вероятности расхождений в информации и значительно ускоряет процесс принятия решений. Допустим, если изменяются параметры обработки в CAD/CAM-системе, то актуализированные сведения мгновенно отправляются в MES-систему, а затем в ЧПУ-контроллер. Специалист получает уже согласованную информацию и может немедленно приступить к работе, не теряя времени на ручное внесение или сопоставление данных.

Интеграция ЧПУ с системами оперативного управления

Современные MES-решения, внедряемые на металлургических предприятиях, обеспечивают не только управление производственными заданиями, но и сбор телеметрических данных в реальном времени, таких как нагрузка на шпиндель и подачу, режимы резания, вибрации, температура, уровень износа, статистика простоя и холостых ходов, данные по качеству

готовой продукции и т. д.

Анализ таких данных в динамике позволяет выявлять отклонения на ранних стадиях. Например, систематическое увеличение вибраций при обработке может сигнализировать о приближающемся износе режущего инструмента или недостаточной жесткости крепления заготовки. В результате предприятие получает возможность реализовать предиктивную модель обслуживания, снижая вероятность отказов оборудования и незапланированных простоев.

Более того, цифровая фиксация телеметрии создает фундамент для внедрения автоматизированных экспертных систем, способных самостоятельно корректировать режимы резания. Уже сегодня многие современные контроллеры ЧПУ оснащаются интерфейсами машинного обучения, которые анализируют поведение оборудования и оптимизируют параметры обработки под конкретные партии деталей.

Цифровой двойник станка и производственного участка

Одним из наиболее перспективных направлений развития является создание цифровых двойников – виртуальных моделей оборудования, воспроизводящих его состояние и работу в реальном времени. Цифровой двойник ЧПУ-станка может содержать:

- кинематическую модель;
- параметры сервоприводов;
- базу режимов обработки;
- историю нагрузок;
- данные об износе узлов и инструментов.

Наличие такой модели позволяет проводить отладку управляющих программ без необходимости останавливать оборудование. Инженер или технолог может протестировать новую траекторию, выявить возможные столкновения, определить оптимальные режимы и только после этого отправить готовую программу на станок.

На уровне производственного участка цифровые двойники дают возможность моделировать загрузку станков, перенастройку маршрутов обработки, а также анализировать влияние изменений в логистике на производительность всего цеха. Для металлургических предприятий, работающих с тяжёлыми и габаритными заготовками, подобная возможность особенно важна, так как любые процессы переналадки станков требуют значительных ресурсов и времени.

Интеграция с ERP и влияние на управление предприятием

Интеграция ЧПУ-оборудования с ERP-системами открывает новые возможности в области производственной логистики. Данные о загрузке станков, статусах заказов, потреблении инструмента и расходных материалов поступают в корпоративную систему и становятся доступными при планировании дальнейших действий или событий, например: закупок, графиков ремонта, расчёта себестоимости продукта, формирования коммерческих предложений.

Такой подход позволяет отказаться от «ручных» методов контроля и планирования, которые в условиях крупных металлургических предприятий

часто становятся источником ошибок и организационных конфликтов.

Например, если MES-система фиксирует ухудшение качества обработки из-за повышенного износа резца, информация автоматически передаётся в ERP. Система может сформировать заявку на пополнение склада инструмента или пересчитать себестоимость партии. Подобные механизмы способствуют повышению прозрачности расходов и исключают человеческий фактор.

Проблемы модернизации парка ЧПУ-станков

Тем не менее, внедрение интеграционных решений сталкивается с рядом объективных сложностей. Существенная часть станочного парка в металлургической отрасли относится к оборудованию 1980–2000 годов выпуска. Такие станки часто оснащены морально устаревшими контроллерами и не поддерживают современные промышленно-сетевые интерфейсы. И для модернизации таких станков требуется установка новых ЧПУ-систем, подключение промышленных шлюзов, замена сервоприводов и датчиков, обновление электрики и систем безопасности и т. д.

Все эти операции требуют значительных вложений, и предприятия зачастую вынуждены выбирать между полной модернизацией и частичным обновлением – например, установкой ограниченного функционала сбора телеметрии.

Не менее серьёзной проблемой является кадровая подготовка. Переход к цифровым технологиям требует специалистов, способных работать на стыке машиностроения, IT и промышленной автоматизации. На многих предприятиях ощущается нехватка технологов, программируемых системных администраторов и операторов, имеющих навыки работы с интегрированными средами.

Кибербезопасность и повышение устойчивости производственной сети

Подключение станков к локальной и корпоративной сети повышает требования к информационной безопасности. Потенциальные угрозы включают:

- перехват управляющих программ;
- удалённое изменение технологических параметров;
- внедрение вредоносного программного обеспечения;
- остановку оборудования через нарушения сетевого взаимодействия.

В связи с этим требуется внедрение сегментированных сетевых архитектур, использование промышленного шифрования, контроль авторизации и мониторинг сетевых событий в реальном времени. Многие современные предприятия дополнительно переходят к использованию защищённых промышленных протоколов, поддерживающих цифровые сертификаты, а также применяют резервные маршруты передачи данных [5].

Удалённое управление и облачные платформы

Ещё одним трендом становится перенос части управляющих функций в облако. Облачные платформы позволяют хранить управляющие программы, централизованно настраивать параметры обработки, организовывать диспетчеризацию в масштабе нескольких предприятий, а также выполнять аналитику и диагностику на серверах повышенной вычислительной мощности.

Это особенно актуально в условиях кадрового дефицита: квалифицированный инженер может удалённо сопровождать сразу несколько производственных площадок, подключаться к телеметрии оборудования и оперативно вносить необходимые корректировки.

Перспективы дальнейшего развития

В ближайшие годы ожидается усиление следующих направлений:

- внедрение моделей искусственного интеллекта, автоматически корректирующих режимы резания на основе анализа телеметрии;
- интеграция ЧПУ-контроллеров с системами компьютерного зрения для автоматической оценки качества поверхности;
- переход к адаптивному управлению, при котором система изменяет параметры обработки «на лету»;
- расширение функционала цифровых двойников и внедрение автоматизированной оптимизации технологических маршрутов.

В совокупности эти тенденции позволяют постепенно переходить от диспетчеризации и «ручной» оптимизации к полностью цифровому управлению производством, где человек выполняет роль аналитика и стратегического координатора, а рутинные операции передаются интеллектуальным системам.

В заключение следует отметить, что интеграция информационных технологий в управление ЧПУ-станками представляет собой неотъемлемую часть цифровизации металлургического производства. При грамотной реализации она обеспечивает повышение производительности, снижение затрат, улучшение качества продукции и повышение конкурентоспособности предприятия в целом. Однако для достижения устойчивого результата требуется комплексный подход, включающий модернизацию оборудования, обучение персонала и внедрение единых стандартов автоматизации.

Список литературы:

1. Босинзон, М. А. Современные системы ЧПУ и их эксплуатация/ М. А. Босинзон: Академия, 2008. – 192 с.
2. С ЧПУ это – Станки с ЧПУ: классификация, параметры, принцип программирования / Все о ЧПУ.ru [Электронный ресурс] URL: <https://vseochpu.ru/stanki-s-chpu/> (Дата обращения: 07.11.2025 г.).
3. Сосонкин, В. Л. Системы числового программного управления. Учебное пособие для вузов / В. Л. Сосонкин, Г. М. Мартинов. – Логос, 2005, – 296 с.
4. Информационные системы управления производственной компанией: учебник и практикум для вузов / [Текст] под редакцией Н. Н. Лычкиной. – Москва: Издательство Юрайт, 2021. – 249 с. – (Высшее образование).
5. Современные зарубежные и отечественные системы мониторинга работы промышленного оборудования / Все промышленные регионы России [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.promreg.ru/articles/sovremennye-zarubezhnye-i-otechestvennye-sistemy-monitoringa-raboty-promyshlennogo-oborudovaniya/> (Дата обращения: 07.11.2025 г.).

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОДУКЦИИ

заведующий кафедрой, канд. техн. наук

Сидельников Владимир Иванович,

Санкт-Петербургский государственный университет

промышленных технологий и дизайна,

Высшая школа технологии и энергетики

Санкт-Петербург, Российская Федерация

заведующий центральной лабораторией **Кокшаров Александр Васильевич,**

АО «Группа «Илим»

г. Коряжма, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена оценке возможности использования систем искусственного интеллекта для оценки и прогнозирования прочностных свойств бумаги на базе экспериментальных данных. Многовариативность входных переменных затрудняет возможность оценки влияния параметров технологического процесса при разработке алгоритмов управления.

Машинное обучение (ML) связано с обработкой больших объемов данных, обеспечивая получение новых знаний с использованием различных известных алгоритмов. Возможность прогнозирования или получения новых математических зависимостей между отдельными переменными позволяет решить задачи совершенствования управления технологическими процессами. Однако при этом следует учитывать, что бумажная продукция является очень сложным изделием с использованием различных компонентов, и это требует особого внимания к объемам и анализу первичных данных.

Ключевые слова: прочностные характеристики, зольность, разрывная длина, искусственный интеллект, технологический процесс, управление, алгоритмы.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF VARIOUS PARAMETERS ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF PULP AND PAPER PRODUCTS

Head of the Department, PhD of Technology **Sidelnikov Vladimir Ivanovich,**

Saint Petersburg State Technical University of Industrial Technologies and Design,

Higher School of Technology and Power Engineering,

Saint Petersburg, Russian Federation

Head of the Central Laboratory **Koksharov Alexander Vasilyevich,**

JSC «Ilim Group»

Koryazhma, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to evaluating the possibility of using artificial intelligence systems to evaluate and predict the strength properties of paper based on

experimental data. The multivariability of input variables makes it difficult to assess the impact of process parameters in the development of control algorithms.

Machine learning (ML) is associated with processing large amounts of data, providing new knowledge using various sophisticated algorithms. The ability to predict or obtain new mathematical relationships between individual variables makes it possible to solve problems of improving process control. However, it should be borne in mind that paper products are very complex products using various components and this requires special attention to the volume and analysis of primary data.

Keywords: strength characteristics, ash content, breaking length, artificial intelligence technological process, management, algorithms.

В последнее время, в связи с бурным развитием цифровых технологий, предпринимаются многочисленные попытки использования искусственного интеллекта (ИИ) для прогнозирования прочностных характеристик целлюлозно-бумажной продукции, выпускаемой на предприятиях отрасли [1]. Зарубежные фирмы предлагают и рекламируют свои разработки, гарантируя хорошие результаты. Однако, следует заметить, что бумажная продукция является очень сложным изделием с использованием многочисленных компонентов, которые обладают собственной вариативностью [2, 8].

Существующий подход к использованию искусственного интеллекта связан с идеей интеграции машинного обучения (ML) в информационные управляющие системы и сервисы. Предполагается использование большого объема неструктурированных данных (Big Data) [3] и наличие эффективных средств для работы с ними. Собираются огромные объемы цифровой информации, которые анализируются для нахождения определенных закономерностей, что позволяет осуществлять классификацию и прогнозирование в целях управления технологическим процессом производства.

ML связана с развитием идеи создания компьютерных моделей и алгоритмов, которые смогут самообучаться на основе поступающих данных и знаний. Эта технология отличается от традиционного статистического анализа данных тем, что использует методы и алгоритмы самообучения. Эта технология отталкивается от гипотезы, что во всех подмножествах однородных данных проявляются одни и те же зависимости между атрибутами, а распределение значений атрибутов не изменяет своего характера во всем множестве входных данных [4, 5, 6]. Основываясь на этой идее, мы можем создать алгоритм, который впоследствии может быть применен к новым наборам без дополнительных ресурсоемких вычислений. В зависимости от особенностей задачи обучения алгоритм может быть ограничен во времени или может быть бесконечным процессом. В последнем случае необходимо определить некую стадию эволюции алгоритма, позволяющую сказать, что он обучен достаточно для того, чтобы производить корректный результат в целях управления.

В совокупности с другими методами для решения задач управления мы можем получить алгоритмы с предсказывающей способностью обеспечения

требуемых прочностных характеристик бумаги в зависимости от параметров технологического процесса. Предсказывающая способность обеспечивается путем обучения на большом массиве данных некой системы в прошлом, а потом моделируется поведение этой системы на другом интервале времени. Выявление закономерностей в данных как классификация помогает восстанавливать или аппроксимировать неизвестную функцию $Y = f(x)$, которая определяет, какой результат (значение функции) соответствует входным параметрам (аргументу). Важно понимать, что входные параметры и результат могут быть сколь угодно разнообразными. В отличие от предсказывающих алгоритмов, они не основываются на хронологии наступления события, а базируются на качественных параметрах, использующих виртуальную функцию близости событий, и таким образом суть ML заключается в том, чтобы в процессе работы алгоритма обучить систему так, чтобы алгоритм смог верно сопоставлять набор входных параметров и знаний, и выдавал соответствующий результат. Цель заключается в частичной или полной автоматизации решения сложных задач, возникающих в процессе управления путем систематизации, обработки анализа производственных данных.

Это касается процессов производства в целлюлозно-бумажной промышленности. Рассмотрим примеры влияния некоторых параметров, влияющих на прочностные характеристики бумажной продукции.

На рисунке 1 представлены производственные данные изменения сопротивления продавливанию флютинга от массы квадратного метра. Как видно из рисунка, зависимость практически линейная, однако в пределах изменения на один грамм вариативность показателя очень значительна.

Прочностные характеристики продукции в значительной степени зависят от прочностных характеристик целлюлозных компонентов, составляющих композицию продукта. Тот же флютинг, в зависимости от вида, может состоять из хвойной, лиственной целлюлозы, полуцеллюлозы, ХТММ, макулатуры. И у каждого из этих компонентов свои прочностные характеристики, которые, в свою очередь, будут также зависеть от степени помола. Для примера, на рисунке 2 представлена зависимость индекса разрушающего усилия для лиственной целлюлозы из смеси березы с осиной и эвкалипта. Из рисунка видно, что даже для близких лиственных пород различия в прочности очень значительны при одинаковых степенях помола.

На прочностные характеристики бумажной продукции также сильно влияет содержание наполнителя. На рисунке 3 представлены производственные данные по влиянию зольности офсетной бумаги на ее разрывную длину [7, 8]. Как видно из рисунка, даже уменьшение зольности на 4 % увеличивает разрывную длину на 600 м.

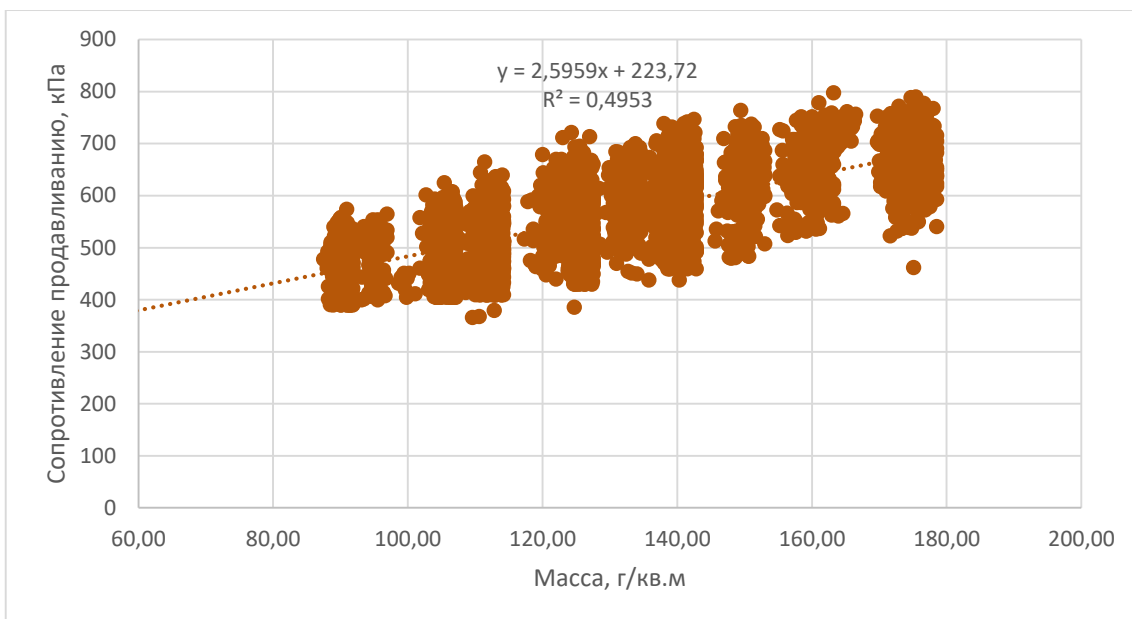


Рисунок 1. Зависимость сопротивления продавливанию от массы квадратного метра образцов

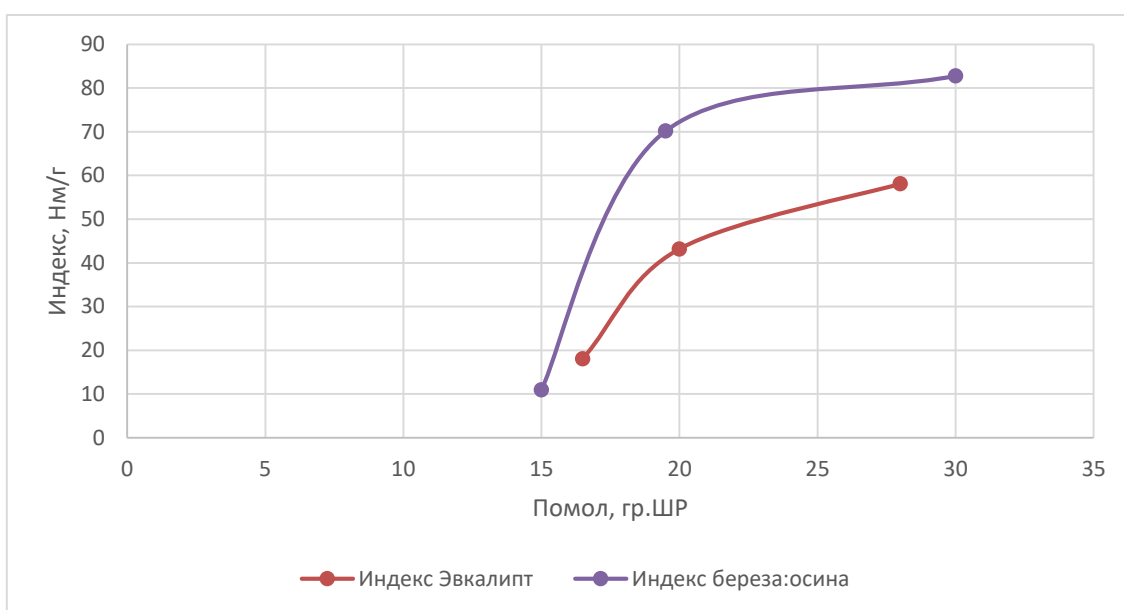


Рисунок 2. Зависимость индекса разрушающего усилия для лиственной целлюлозы из смеси березы с осиной и эвкалипта при разных степенях помола

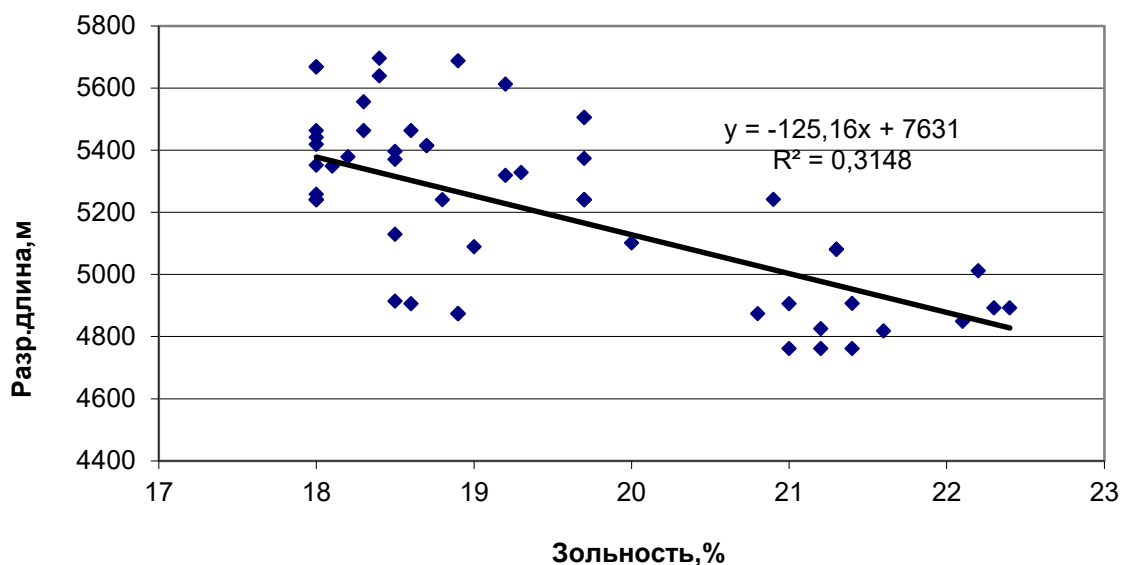


Рисунок 3. Влияние зольности офсетной бумаги на ее разрывную длину

Выводы

Как видно из представленных результатов, в производственных условиях из-за значительной вариативности основных причин, влияющих на прочностные характеристики целлюлозно-бумажной продукции, практически невозможно достаточно точно предсказать конечный результат, даже если иметь большой набор предварительных лабораторных испытаний и показаний датчиков. Наблюдается вариативность не только параметров сырья и технологического процесса, но и каждая бумагоделательная машина имеет свои особенности и изменяется в течение времени эксплуатации, что делает невозможным использование систем машинного обучения, несмотря на огромные объемы накопленных данных [9].

Таким образом, при современном развитии системы искусственного интеллекта могут дать только грубую оценку конечного результата, что никаким образом пока не окупает затраченных средств на его внедрение.

Список литературы:

1. Городецкий, В. И. Искусственный интеллект: метафора, наука и информационная технология / В. И. Городецкий, Р. М. Юсупов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Т. 21, № 5. – С. 282–294.
2. Сидельников, В. И. Приближенная математическая модель показателя прочности бумаги на примере сопротивления торцевому сжатию / В. И. Сидельников, А. В. Кошаров, И. В. Ремизова // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2022. – № 3. – С. 143–146.
3. Келлехер, Дж. Наука о данных: базовый курс / Джон Келлехер, Брендан Тирни; перевод с английского М. Белоголовского. – Москва: Альпина Пабlishер, 2020. – 220 с.

4. Попов, С. Большие данные в промышленности: как обеспечить максимальную выгоду от инноваций / С. Попов // Control Engineering Россия. – 2017. – № 1 (67). – С. 26–29. – URL: controleng.ru (дата обращения: 23.01.2026). – Текст: электронный.
5. Сейновски, Т. Дж. Антология машинного обучения. Важнейшие исследования в области ИИ за последние 60 лет / Терренс Сейновски; перевод с английского М. А. Райтмана, Е. В. Сазановой. – Москва: Бомбора, 2022. – 300 с.
6. Сидельников, В. И. Использование машинного обучения при разработке системы автоматизации процесса отбелки целлюлозы / В. И. Сидельников, А. В. Кокшаров, И. В. Анисимов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2024. – № 1. – С. 168–171.
7. Сидельников, В. И. Опыт применения виртуальных датчиков в процессах производства бумаги / В. И. Сидельников, А. В. Кокшаров, В. Г. Никешин // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2023. – № 66 (92). – С. 118–121.
8. Сидельников, В. И. Экспресс-анализ качества отбелки бумажного полотна на базе искусственного интеллекта / В. И. Сидельников, А. В. Кокшаров, И. В. Анисимов // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения: материалы V Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ЦБП (Санкт-Петербург, 13–14 ноября 2023 г.) / ответственные редакторы: О. В. Фёдорова, О. В. Запольская. – Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. – С. 90–96.
9. Сидельников, В. И. Идеология оптимального управления в современном производстве / В. И. Сидельников, В. Г. Никешин // Цифровизация науки и образования: современные вызовы и возможности: сборник статей X Всероссийской научно-практической конференции. – Москва, 2024. – С. 19–22.

© Сидельников В. И., Кокшаров А. В., 2025

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF MODERN ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES

Master Student **Gilyaziev Amir Radikovich**,
Associate Professor **Marzoeva Irina Vladimirovna**,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The paper presents a comprehensive overview of modern energy storage technologies. The main types of storage devices are considered: mechanical, electrochemical, electromagnetic and thermal. The principles of operation, key advantages, disadvantages and examples of practical implementation are analyzed for each type. Based on the comparative analysis, a conclusion is drawn about the prospects and key advantages of thermal energy storage devices in terms of versatility, safety, efficiency and durability for modern and future energy systems.

Keywords: energy storage, energy storage systems, thermal accumulators, energy efficiency, renewable energy sources.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

магистрант **Гилязиев Амир Радикович**,
доцент **Марзоева Ирина Владимировна**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В работе представлен комплексный обзор современных технологий аккумулирования энергии. Рассмотрены основные типы накопителей: механические, электрохимические, электромагнитные и тепловые. Для каждого типа проанализированы принципы работы, ключевые преимущества, недостатки и примеры практической реализации. На основе сравнительного анализа делается вывод о перспективности и ключевых преимуществах тепловых накопителей энергии с точки зрения универсальности, безопасности, экономичности и долговечности для современных и будущих энергетических систем.

Ключевые слова: накопители энергии, энергоаккумулирующие системы, тепловые аккумуляторы, энергоэффективность, возобновляемые источники энергии.

In the context of the rapid development of vectors for improving energy efficiency and energy conservation in various areas of energy generation and consumption, the problem of energy storage is becoming particularly relevant [1-3]. This aspect is of paramount importance for modern and promising technologies such

as alternative energy, electric and hydrogen transport, as well as other innovative solutions. Efficient energy storage can significantly reduce operating costs and increase the economic feasibility of implementing these technologies.

Today, there is a wide range of technological solutions in the field of energy storage, including supercapacitors, flow batteries, electrochemical systems, thermal storage and others. These technologies represent a variety of approaches to solving the problem of energy storage, each of which has its own unique advantages and limitations. From the point of view of the physical nature of the processes associated with energy storage and conversion, storage devices can be divided into four main categories: mechanical, electromagnetic, chemical and thermal.

Mechanical energy storage devices are complex dynamic systems operating on the basis of the fundamental laws of classical mechanics. These systems can be classified depending on the method of energy storage, which may include the accumulation of kinetic energy through the movement or rotation of material objects, or the use of energy of deformation resulting from bending, stretching or compression of materials [4]. Their work is based on the principle of converting mechanical energy into electrical energy and energy conservation, which makes it possible to efficiently accumulate and release energy resources as needed.

Pumped storage power plants (HPPs) are a prime example of mechanical energy storage devices operating on the principle of converting electrical energy into potential water energy and vice versa. During periods of excess electricity in the grid, usually at night or with low power consumption, the station's pumps pump water from the lower reservoir to the upper one, thereby storing energy. When there is a need for additional power, during peak load hours, the water is discharged back into the lower pool through hydraulic turbines that power generators that generate electricity. Such stations are characterized by high power, up to several gigawatts, and significant energy intensity, allowing them to accumulate and release large amounts of energy, up to tens of gigawatt-hours. The efficiency of modern hydropower plants reaches high values, and their service life exceeds several decades, which makes them a reliable solution for balancing energy systems and integrating renewable energy sources. Also, the advantages of the PSPP are high maneuverability and the possibility of multiple charge-discharge cycles. However, this method of accumulation has disadvantages, such as the high capital intensity of construction, a long payback period, and special geographical conditions are required for station placement – a significant height difference, on the order of several hundred meters, between reservoirs and sufficient water resources, which limits possible construction sites, and finally, from an ecological point of view, flooding of territories, changes in local ecosystems and possible effects on groundwater.

Another well-known storage of mechanical energy is gravitational energy storage [5]. They are systems based on the use of gravity to accumulate and then release energy. The principle of their operation is to convert potential energy into other forms, which makes it possible to effectively manage energy resources. During periods of excessive energy generation, the load is lifted to a certain height using special systems, accumulating potential energy in the gravitational field. If it is necessary to release energy, the load is lowered, then by means of mechanical or

hydraulic systems, kinetic energy is converted into electrical energy through a generator, providing stable and reliable power supply, and enters the power grid.

One of the practical implementations of this technology is the Swiss–American Energy Vault project, launched in 2022 [6]. The system uses multi-ton concrete blocks that are lifted to a height of several hundred meters by electric cranes. If necessary, the power supply units are lowered at a certain low speed, powering the generators.

Electrochemical energy storage devices operate on the principle of reversible redox reactions [7]. When charged, electrical energy is converted into chemical energy, and when discharged, the reverse process occurs. The main components used in these devices are anode, negative electrode; cathode, positive electrode; electrolyte, a substance that conducts electric current as a result of decomposition into ions. Currently, there are various types of batteries: lithium-ion, lead-acid and flowing redox batteries. In various modes of operation, they demonstrate high energy density and rapid response to changes in consumption, therefore, this factor indicates their optimal use as backup power sources, as well as to smooth peak loads in energy systems. However, despite these advantages, the proposed devices have a significant disadvantage associated with a limited-service life and a gradual decrease in capacity during use. They require regular maintenance, replacement of spent elements or their recycling, which is a significant economic and environmental problem.

The Gigafactory project, launched by Tesla, is focused on the mass production of lithium-ion batteries for electric vehicles and stationary energy storage devices [8]. From the point of view of electrochemistry, advanced cathode materials are used here, for example, NCA, nickel-cobalt-aluminum oxide, and NMC, nickel-manganese-cobalt oxide, and anodes, graphite with silicon additives, which allows to achieve high specific energy consumption, about several hundred Wh/kg, and a long service life, on the order of a thousand charge-discharge cycles. The project plays a key role in scaling energy storage technologies, facilitating the transition to renewable sources.

Electromagnetic energy storage devices represent a unique class of energy storage systems based on the principles of electromagnetism. These devices are capable of storing energy in the form of an electromagnetic field and giving it away almost instantly, if necessary, which makes them indispensable for solving specific tasks in the energy sector, for example, instantaneous stabilization of frequency and voltage in networks, compensation for short-term power failures [9].

This category of devices includes, for example, superconducting magnetic storage devices and capacitors. These systems use a magnetic field to convert and store electrical energy, providing almost instant access to accumulated resources [10]. Their relevance is particularly high in situations requiring high power over a short time interval, such as the stabilization of the frequency and quality of electricity in energy systems. However, despite their advantages, these energy storage devices face a number of technical and economic challenges. In particular, the use of superconducting materials is associated with high costs, which limits their widespread use. In addition, capacitors, being key components in these systems, have a limited-

service life, which requires the development of methods for their reliable operation and prolongation of their life cycle.

One of the most well-known real-world projects is 6 American Superconductor superconducting magnetic storage SMES, installed in 2000 to stabilize the power grid in North Winston (USA) [11]. The power system helps to smooth out fluctuations in the isolated city network, compensating for voltage failures when connecting diesel generators. This is the first commercial SME in the USA, operating at sufficiently low cryogenic temperatures, 4.2 K, and providing instant power supply in a few ms. The project has proven the effectiveness of such drives for remote regions with unstable networks.

Thermal energy storage systems are specialized systems designed to accumulate thermal energy during periods of excessive production and subsequent use in times of shortage. Unlike many other energy storage systems, they do not use toxic materials or complex chemical compounds, which makes them one of the most promising solutions for energy storage. Among the most common and effective solutions in this area are systems that use water, various salt compounds, or natural stone materials as a heat storage material. These substances have a high heat capacity, stability under cyclic temperature loads and affordable cost, which makes them ideal for creating scalable thermal storage systems [12]. An important feature of modern thermal storage devices is their ability to integrate into various energy systems, from individual solar installations to large industrial thermal power plants.

Thus, thermal energy storage devices have a number of key advantages that make them the preferred choice over their mechanical, electromagnetic, and electrochemical counterparts. Their versatility makes it possible to effectively integrate with renewable energy sources and industrial systems, providing flexibility in application. Due to their scalability, they can be used on both small and fairly large scales, adapting to different energy needs. A high level of safety eliminates the risks of explosions or toxic emissions, which is especially important for environmentally responsible projects. Cost-effectiveness due to the use of affordable materials reduces capital and operating costs. In addition, thermal storage devices demonstrate stable performance without degradation over time, unlike electrochemical systems, which ensures long-term reliability and reduced maintenance costs. These advantages make thermal energy storage the optimal solution for modern and future energy systems.

Список литературы:

1. Оценка процесса переноса энергии в тепловом накопителе с высокотемпературным рабочим телом при его разрядке / А. Н. Чадаев, А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2024. – Т. 24, № 4. – С. 73-85. – DOI 10.14529/power240409. – EDN XJZJKR.
2. Alva G., Lin Y., Fang G. An overview of thermal energy storage systems. *Energy*. 2018; 144:341-378. doi: 10.1016/j.energy.2017.12.037.

3. Zinurov V., Nikandrova M., Kharkov V. Assessment of thermal storage technologies in energy sector. 2020 Ural Smart Energy Conference. 2020. pp. 68-71. doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281236.
4. Mahmoud M., Ramadan M., Naher S. et al. A review of mechanical energy storage systems combined with wind and solar applications // *Energy Conversion and Management*. – 2020. – Vol. 210. – P. 112670.
5. Alami A. H. Mechanical energy storage for renewable and sustainable energy resources. – Cham, Switzerland: Springer, 2020. – 71 p.
6. Energy Vault: [официальный сайт]. – URL: <https://www.energyvault.com/> (дата обращения: 25.11.2025).
7. Soloveichik G. L. Battery technologies for large-scale stationary energy storage. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*. 2011; 2:503-527. doi: 10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116.
8. Tesla Giga Texas: [официальный сайт]. – URL: <https://www.tesla.com/giga-texas> (дата обращения: 25.11.2025).
9. Morandi, A., Breschi, M., Ribani, P., et. al. Superconducting magnetic energy storage. *Energy Storage for Power Systems*. 2020. doi: 10.1049/pbpo063e_ch11.
10. Ковалев, К. Л. Применение сверхпроводниковых технологий для возобновляемой энергетики / К. Л. Ковалев, В. Н. Полтавец, И. П. Колчанова // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы*. – 2020. – № 2(103). – С. 82-96. – EDN XACANR.
11. AMSC: [официальный сайт]. – URL: <https://www.amsc.com/> (дата обращения: 25.11.2025).
12. Yuan K., Shi, J., Aftab, W., et. al. Engineering the thermal conductivity of functional phase-change materials for heat energy conversion, storage, and utilization. *Advanced Functional Materials*. 2020;30(8):1904228. doi: 10.1002/adfm.201904228.

© Гилязиев А. Р., Марзоева И. В., 2025

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ПЕРЕХОДНОМ ПРОЦЕССЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

канд. техн. наук, доцент **Мезенцева Антонина Викторовна**,
Нижевартовский государственный университет
г. Нижневартовск, Российская Федерация

Аннотация. При проектировании электрического привода наибольшая энергетическая эффективность достигается за счет повышения его общей эффективности. Для того, чтобы оценить целесообразность изменения параметров электропривода, необходимо знать ограничения в переходном процессе двигателя, обусловленные потерями энергии. В ходе анализа рассмотрен режим пуска асинхронного двигателя прямым включением в сеть; установлено, что энергия, выделяющаяся в роторе, соответствует изменению энергии электромеханической системы; получены условия и соотношение величин избыточного динамического момента и маховых моментов электродвигателя и механизма, которое в переходном режиме должно быть постоянным.

Ключевые слова: двигатель, момент, потери, пуск, энергия.

ANALYSIS OF ENERGY CHARACTERISTICS IN THE TRANSIENT PROCESS OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR

PhD in Technology, Associate Professor
Mezentseva Antonina Viktorovna,
Nizhnevartovsk State University
Nizhnevartovsk, Russian Federation

Abstract. When designing an electric drive, the greatest energy efficiency is achieved by increasing its overall efficiency. In order to assess the feasibility of changing the parameters of the electric drive, it is necessary to know the limitations in the motor's transient process caused by energy losses. During the analysis, the starting mode of an asynchronous motor with direct connection to the network was considered, and it was established that the energy released in the rotor corresponds to the change in the energy of the electromechanical system. The conditions and the ratio of the excess dynamic torque and the inertial moments of the electric motor and the mechanism were obtained, which should be constant during the transient mode.

Keywords: двигатель, момент, потери, пуск, энергия.

Асинхронные электродвигатели довольно часто работают в режимах пуска или останова. Частота пусков может существенно меняться в зависимости от вида и мощности электрического привода: чаще всего в режиме пуска работают двигатели малой и средней мощности, приводящие в движение

различное технологическое оборудование, оказывающее влияние на работу электропривода [1, с. 281]. Мощные двигатели крупных машин пускают в ход и останавливают значительно реже из-за высоких тепловых нагрузок. Рассмотрим наиболее распространенный режим пуска прямым включением в сеть асинхронного двигателя, нагруженного моментом сопротивления, который зависит от частоты вращения ротора и тока и не зависит от скорости изменения частоты вращения во времени, т. е. будем считать избыточный динамический момент одним и тем же как при быстром, так и при медленном пуске, а также при длительном режиме работы с определенной частотой вращения. При этом электромагнитные переходные процессы затухают достаточно быстро и не оказывают влияние на электромеханический переходной процесс. Известно, что полезная мощность на валу зависит от частоты вращения ротора ω_2 , а момент пропорционален потерям в роторе p_2 и зависит от скольжения s :

$$M = p_2 / s \omega_1 , \quad (1)$$

где ω_1 – синхронная частота вращения.

Пусковой момент электродвигателя должен быть больше момента сопротивления, при пуске необходимо учитывать и величину избыточного момента, также при расчетах необходимо знать каталожные данные эксплуатируемого привода и время его пуска [2, с. 71]. Из основного уравнения движения электропривода по условию равенства моментов в период пуска или торможения:

$$M = J \frac{d\omega_2}{dt} + M_c , \quad (2)$$

где J – момент инерции электромеханической системы, получаем:

$$dt = \frac{J d\omega_2}{M - M_c} = \frac{J d[\omega_1(1 - s)]}{M - M_c} = J d\omega_2 \psi_{M_u}(\omega) = - J \omega_1 ds \psi_{M_u}(s) , \quad (3)$$

где $\psi_{M_u} = 1/(M - M_c)$ – величина избыточного динамического момента.

Для простоты расчетов будем считать ψ_{M_u} функцией, зависимой от скорости двигателя или от скольжения. Примем функцию избыточного динамического момента за время переходного процесса равной некоторому среднему значению

$$\psi_{cp.M_u} = \frac{1}{(M - M_c)_{cp}} = \frac{1}{M \left(1 - \frac{M_c}{M}\right)_{cp}} = \frac{1}{M k_{cp.M_u}} . \quad (4)$$

Преобразуем выражение (3), тогда:

$$t = J \int_{\omega_0}^{\omega} \psi_{M_u} d\omega = - J \omega_1 \int_{s_0}^s \psi_{M_u} ds , \quad (5)$$

и в результате интегрирования (7) получим:

$$t = J \frac{\omega - \omega_0}{Mk_{cpM_u}} = J\omega_1 \frac{s_0 - s}{Mk_{cpM_u}}. \quad (6)$$

Экономичность электрического привода оценивается потерями мощности при регулировании производительности приводимого механизма [3, с. 520]. Потери в асинхронном двигателе определяются частотой вращения, при номинальных нагрузках снижение частоты вращения приводит к увеличению суммарных потерь двигателя. Рассчитаем потери в роторе при пуске, для чего умножим обе части уравнения (2) на dt и перепишем его с учетом выражения (1):

$$p_2 = \frac{dt}{s\omega_1} = Jd\omega_2 + M_c dt. \quad (7)$$

Подставив (3) в (7), получим:

$$p_2 = Js\omega_1 d\omega_2 + M_c s\omega_1 \frac{Jd\omega_2}{M - M_c}. \quad (8)$$

Проинтегрируем (8) от 0 до окончания процесса пуска t_n , при этом учтем, что $d\omega_2 = -\omega_1 ds$, при этом началу переходного процесса соответствует скольжение s_0 , а окончанию скольжение s . Тогда энергия в роторе, которая выделится за период пуска t_n , будет равна [4, с. 348]:

$$A = \int_0^{t_n} p_2 dt = -J\omega_1^2 \int_{s_0}^s s \left(1 + \frac{M_c}{M - M_c}\right) ds = J\omega_1^2 \int_{s_0}^s \frac{s}{1 - \frac{M_c}{M}} ds, \quad (9)$$

где M и M_c – моменты двигательный и сопротивления, зависящие от скольжения.

В случае, когда отношение M_c/M за время переходного режима соответствует или близко по значению постоянной величине, то это отношение можно заменить средним значением. Для этого вводится коэффициент избыточного динамического момента, который равен:

$$k_{M_u} = \frac{1}{s_0 - s} \int_{s_0}^s \left(1 - \frac{M_c}{M}\right) ds, \quad (10)$$

Энергия, которая выделится в роторе, будет в свою очередь зависеть от переменных состояния привода начального и конечного значений скольжений. Величина потерь при пуске, в Дж, будет равна:

$$A = \frac{J\omega_1^2}{2}(s_0^2 - s^2) \frac{1}{k_{M_u}}, \quad (11)$$

или

$$A = \frac{J\omega_1^2}{2} \left[(s_0^2 - s^2) + \int_s^{s_0} \left(\frac{M_c}{M - M_c} \right) s ds \right]. \quad (12)$$

Когда момент сопротивления равен $M_c=0$, а коэффициент избыточного динамического момента $k_{M_u}=1$, второй член выражения (12) исчезает и, следовательно, при переходе из одного режима в другой и отсутствии момента сопротивления, энергия, которая выделилась в роторе электродвигателя, соответствует изменению кинетической энергии электромеханической системы. При $k_{M_u}=\text{const}$ (12) будет равно:

$$A = \frac{J\omega_1^2}{2}(s_0^2 - s^2) + \frac{J\omega_1^2}{2}(s_0^2 - s^2) \frac{1 - k_{M_u}}{k_{M_u}}. \quad (13)$$

Второе слагаемое (13) представляет собой работу, совершаемую для преодоления момента сил сопротивления при пуске. При торможении знак момента сопротивления изменяется на противоположный, поэтому второе слагаемое в выражении также меняет свой знак.

Анализируя (13), можно сделать вывод, что чем больше отношение M/M_c , то есть меньше k_u , тем меньше потерь в роторе при пуске, а при $M_c=0$ энергия, выделяющаяся в роторе, не будет зависеть ни от скорости переходного процесса, ни от вида зависимости момента от скольжения.

Постоянную времени пуска электродвигателя, т. е. время разгона до установившейся номинальной скорости под действием двигательного момента [5, с. 39] можно представить через маховые моменты соответственно ротора двигателя и механизма:

$$T_M = \frac{(GD_\partial^2 + GD_M^2)}{P_n}, \quad (14)$$

при этом

$$GD_M^2 + GD_\partial^2 = GD_\partial^2 \left(1 + \frac{GD_M^2}{GD_\partial^2} \right) = GD_\partial^2 k_{GD}, \quad (15)$$

где k_{GD} представляет собой соотношение маховых моментов двигателя и механизма.

Множитель в (13) $J\omega_1^2/2$ можно представить как полную энергию за время переходного процесса, равную $T_M P_n/2$, где P_n – номинальная мощность.

С учетом этого выражение (11) примет вид:

$$A = \frac{P_n T_m (s_0^2 - s^2)}{2} \frac{k_{GD}}{k_{M_u}}. \quad (16)$$

Продолжительность затухания переходных процессов во многом зависит от механических параметров двигателя – моментов инерции и сопротивления на валу электрического двигателя [6, с. 26]. Если двигатель рассчитан на определенные значения коэффициентов избыточного динамического момента и соотношения маховых моментов, то для того, чтобы энергоэффективность двигателя не ухудшалась в результате изменения k_{M_u} , например при снижении напряжения, k_{GD} должно также измениться прямо пропорционально k_{M_u} . Максимально возможное допустимое значение k_{GD} будет при $k_{M_u}=1$.

На практике также учитывают нагрев ротора двигателя, а по нему определяют маховой момент механизма в переходном режиме без учета момента сопротивления при $k_u=1$. Для всех остальных условий пуска, реверса или торможения с учетом момента сопротивления, когда $k_u < 1$, расчет производят так, чтобы соотношение k_G/k_u не изменялось.

Список литературы:

1. Онищенко, Г. Б. Электрический привод: учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. – М: РАСХН, 2003. – 320 с. – Текст: непосредственный.
2. Слепушкина, Ж. Ю. Особенности расчета времени пуска асинхронного двигателя по справочным данным / Ж. Ю. Слепушкина, Б. П. Береза, А. М. Олейников // Вестник СевГТУ. – 2008. – Вып.88. – С.71-76.
3. Мезенцева, А. В. Исследование регулирования подачи насоса электрическим способом / А. В. Мезенцева // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы: Материалы IX Междунар. науч-практ. конф. – Нижневартовск: НВГУ, 2021. – С. 519-524.
4. Ключев, В. И. Теория электропривода: учеб. для вузов / В. И. Ключев. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с. – Текст: непосредственный.
5. Шабад, В. К. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах / В. К. Шабад – М: Издательский центр «Академия», 2013. – 192 с. – Текст: непосредственный.
6. Ершов, М. С. Математическая модель переходных процессов в электромеханической системе асинхронный электродвигатель — турбомашина / М. С. Ершов, А. Д. Яризов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 1999. – № 3. – URL: cyberleninka.ru (дата обращения: 29.11.2025). – Текст: электронный.

© Мезенцева А. В., 2025

КАТАЛИЗАТОРЫ ПАРОВОЙ КОНВЕРСИИ МЕТАНА ДЛЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

студент **Андреева Екатерина Александровна**,
магистрант **Смоленов Андрей Евгеньевич**,
канд. хим. наук, доцент **Попова Юлия Владимировна**,
канд. хим. наук, доцент **Карасева Ирина Николаевна**,
Самарский государственный технический университет,
г. Самара, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматриваются ключевые аспекты разработки и применения катализаторов для паровой конверсии метана как основного промышленного метода производства водорода. Проанализированы ключевые проблемы эксплуатации: закоксование, отравление примесями, термическая деградация – и современные подходы к их решению. Показана роль катализаторов в снижении энергозатрат и повышении селективности процесса. Обоснована значимость разработки устойчивых катализаторов для снижения углеродного следа и повышения конкурентоспособности водородной энергетики.

Ключевые слова: паровая конверсия метана, водородная энергетика, катализаторы, закоксование, промотирование.

METHANE VAPOR CONVERSION CATALYSTS FOR HYDROGEN ENERGY

Student **Andreeva Ekaterina Alexandrovna**,
Master Student **Smolenov Andrey Evgenievich**,
PhD in Chemical, Associate Professor **Popova Yulia Vladimirovna**,
PhD in Chemical, Associate Professor **Karaseva Irina Nikolaevna**,
Samara State Technical University,
Samara, Russian Federation

Abstract. This paper examines key aspects of the development and application of catalysts for steam methane reforming as the primary industrial method for hydrogen production. Key operational challenges – coking, impurity contamination, and thermal degradation – and current approaches to addressing them are analyzed. The role of catalysts in reducing energy costs and increasing process selectivity is demonstrated. The importance of developing sustainable catalysts for reducing the carbon footprint and enhancing the competitiveness of hydrogen energy is substantiated.

Keywords: steam methane reforming, hydrogen energy, catalysts, coking, promotion.

В современной нефтехимической промышленности переработка углеводородов представляет собой перспективное направление для получения водорода из разнообразных источников [1]. Водород, являясь важным сырьем для химической и нефтехимической отраслей, одновременно выступает эффективным энергоносителем.

В современной промышленности паровой риформинг (ПКМ, SMR) остается доминирующей технологией для получения синтез-газа. Данный продукт выступает промежуточным реагентом в процессах синтеза метанола, аммиака, уксусной кислоты, кроме того, он находит применение в производстве транспортного топлива (реакция Фишера-Тропша), и для получения водорода высокой чистоты [2].

SMR процесс состоит из нескольких каталитических реакций, таких как конверсия водяного пара, обратная конверсия воды в газ, диспропорционирование СО (реакция Будуара) и разложение метана. В табл. 1 представлены данные уравнения [3].

Таблица 1. Каталитические реакции, описывающие паровую конверсию метана

№ реакции	Уравнение реакции	Энтальпия реакции, кДж/моль
1	$\text{CH}_4(\text{г}) + \text{H}_2\text{O}(\text{г}) \rightarrow 3 \text{H}_2(\text{г}) + \text{CO}(\text{г})$	$\Delta H_{298}^{\circ} = +205.9$
2	$\text{CO}(\text{г}) + \text{H}_2\text{O}(\text{г}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{г}) + \text{H}_2(\text{г})$	$\Delta H_{298}^{\circ} = -41$
3	$2\text{CO}(\text{г}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{г}) + \text{C}$	$\Delta H_{298}^{\circ} = -172.4$
4	$\text{CH}_4(\text{г}) \rightarrow \text{C} + \text{H}_2(\text{г})$	$\Delta H_{298}^{\circ} = +74.6$
5	$\text{C} + \text{H}_2\text{O}(\text{г}) \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2(\text{г})$	$\Delta H_{298}^{\circ} = +131.3$
6	$\text{CO}(\text{г}) + 0.5 \text{O}_2(\text{г}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{г})$	$\Delta H_{298}^{\circ} = -283$
7	$\text{CO}(\text{г}) + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4(\text{г}) + \text{H}_2\text{O}(\text{г})$	$\Delta H_{298}^{\circ} = -205.9$

Этапы процесса ПКМ для получения чистого водорода можно разделить на этапы: предварительную подготовку сырья, паровой риформинг, конверсию СО и очистку водорода.

Реакция (1) табл. 1 является эндотермической. Эффективность конверсии реакции определяется совокупным воздействием следующих технологических параметров: температуры процесса, давления и мольного соотношения пар / углерод (S/C). Полная конверсия метана достигается при следующих условиях: температура около 700 °С, давление 1 бар, соотношение $\text{H}_2\text{O}/\text{C}$ выше 2,5. Следует учесть, что при давлении 20 бар потребуется температура выше 900 °С. Минимальное отношение количества водяного пара к углероду в сырье (в молях) должно составлять 0,4-0,6, а рекомендуемое количество – 1,6-3,5 [4]. Процесс проводится при температуре 900 – 1000°С, давлении 1,5–3,0 МПа и объемной скорости подачи сырья 1000 ч⁻¹

Паровой риформинг катализируется переходными металлами 8-10 групп периодической системы. Как экспериментальные результаты, так и теоретические расчеты показывают, что Rh и Ru являются наиболее активными

переходными металлами для парового риформинга, Ni и Ir проявляют промежуточную активность, а Pt и Pd менее активны [5]. Co и Fe также активны, но склонны к окислению в условиях реакции [5]. Отмечается, что используемые катализаторы парового риформинга в разной степени способствуют образованию углерода. В промышленности используют катализаторы на основе никеля, поскольку он является предпочтительным металлом, ввиду достаточной активности и низкой стоимости. Никелевые катализаторы, нанесенные на оксид алюминия, подвергаются дезактивации вследствие коксообразования. В связи с этим, проблема реализации новых катализаторов конверсии метана, устойчивых к коксообразованию, становится актуальной.

Исследования новых катализаторов сводятся к различным подходам, включая приготовление самого катализатора, введение промотора и использование различных носителей. Катализатор Ni-Al₂O₃ готовят методом пропитки. Как указано в литературе [3], слабо связанные частицы Ni имеют тенденцию к агрегации и образованию крупных частиц, которые катализируют реакцию образования сажи. Отмечается [6], что золь-гель методом возможно получить катализаторы с частицами Ni высокой дисперсности и выраженным эффектом взаимодействия металл-носитель.

Также отмечается [3], что некоторые количества промоторов подавляют образование сажи в процессе риформинга. Так, щелочные и щелочноземельные металлы часто применяют для повышения стабильности катализаторов. В работе [7] Mg-и Ca-содержащие катализаторы готовили путем пропитки α-Al₂O₃ прекурсорами Mg(NO₃)₂ · 6H₂O или Ca(NO₃)₂ · 4H₂O, последующей сушкой при 120 °C и прокаливанием при 650 °C. Таким образом, введение MgO в состав катализатора (промотирование) способствует: увеличению основности катализатора, повышению его сродства к молекулам водяного пара, а также снижению скорости образования углеродистых отложений на поверхности. Катализатор CaO/Al₂O₃ с соотношением 3 к 1 и концентрацией Ni 31 (масс. %) показал высокую стабильность к коксообразованию [4].

В работе [8] показано, что бор повышает начальную конверсию метана Ni/Al -катализатора с 56 до 61 % и снижает дезактивацию с 70 до 30 %.

Образование аморфного углерода возникает при снижении температуры ниже определенного предельного значения, а также уменьшении концентрации водорода и водяного пара. В случае превышения температуры образуется игольчатая сажа [4]. Можно эмпирически предсказать, при каких условиях формируется сажа. По формуле (1) можно рассчитать критическое соотношение водяного пара к парциальному давлению гомологов метана, при котором начинает формироваться углерод [3]:

$$\left(\frac{p_{H_2O}}{p_{CnHm}}\right)_{crit} = -\frac{a}{T} + b \quad (1),$$

где а, b – эмпирические коэффициенты, которые зависят от свойств катализатора и состава сырья.

Катализаторы типа Ni/La/Al со структурой перовскита показали [9] почти

полную конверсию метана при 850 °С и мольном соотношении 1,24, при этом наблюдалось незначительное образование сажи, что указывает на длительную стабильность катализатора. Катализаторы Ni/Al, промотированные Mo, обладают большей стабильностью, чем Ni/Al. При молярном соотношении Ni/Al равного 3 с 0,05 % Mo достигнута конверсия около 85 %.

La, Ce, Gd, Sm могут выступать также перспективными промоторами для Ni-катализаторов [3]. Добавление церия как промотора [10] позволяет улучшить дисперсию никеля из-за блокировки активных центров. Катализаторы Ni-Ce/Al с содержанием Ni 13 масс.% и Ce 0-2,0 масс.% были изучены методами БЭТ, адсорбции/десорции N₂, ПЭМ и др. Оптимальная активность и стабильность под давлением наблюдались для катализаторов Ni/Ce/Al (1,02 масс.% Ce) с конверсией углерода 75 % и соотношении H₂O/C 2,7, объемной скорости углерода 6000 ч⁻¹, температуры и давления 3 МПа. Данный катализатор продемонстрировал наилучшие каталитические характеристики и наибольшую устойчивость к отложению углерода, сохранив размер частиц Ni 13 нм после 300 ч эксперимента.

Интерес к перовскитам, на примере LaAlO₃ как носителя катализатора, проявляется благодаря высокой площади поверхности, а также наличию химической, термической и механической стабильности [11]. Получение данных соединений достигается высокопроизводительными, экономичными и экологически безопасными способами. Например, если использовать промышленные металлические отходы в качестве прекурсоров, то это может представлять интерес для внедрения принципов «зеленой химии».

Таким образом, катализ парового риформинга играет ключевую роль в энергетике. Усовершенствования направлены на повышение активности, стабильности и устойчивости катализаторов к дезактивации, которые диктуются современными условиями промышленного производства, экономики и экологии.

Список литературы:

1. Kurmashov, P. B. (2023) Solution combustion synthesis of Ni/Al₂O₃ catalyst for methane decomposition: effect of fuel /P. B. Kurmashov, A. V. Ukhina, A. Manakov [et all.]. *Appl. Sci.*13, 3962.
2. Тарасов, А. Л. Паровая конверсия метана на фехрале / А. Л. Тарасов, А. Л. Кустов, А. Н. Каленчук, П. В. Соколовский, В. Н. Богданов, И. Г. Гидядов – Текст: непосредственный // Журнал физической химии. – 2020. – Т.94. – № 94. – С. 1437-1440.
3. Liu, K. (2010) Hydrogen and syngas production and purification technologies / K. Liu, C. Song, V. Subramani. *John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey*, 564.
4. Строкин, С. В. Обзор перспектив применения мягкого парового риформинга легких углеводородов на нефтяных и газоконденсатных месторождениях / С. В. Строкин, С. В. Дронов, О. В. Леонова – Текст: непосредственный // Известия СПбГТИ (ТУ) – 2023. – № 66. –Т.92. – С. 41-51.

5. Степанов, А. А. Направления каталитической переработки метана в ценные химические продукты / А. А. Степанов, А. В. Восмерилов – Текст: непосредственный // НефтеГазоХимия. 2024. – Т. 3 – №4. – С.56 – 64.
6. Kim, J.-H. (2000) Effect of metal particle size on coking during CO₂ reforming of CH₄ over Ni - alumina aerogel catalysts. / J.-H. Kim, D.J. Suh, T.-J. Park, K.-L. Kim, *Applied Catalysis. A, General*, 197 (2), 191.
7. Lisboa, J.D.S. (2005) Influence of the addition of promoters to steam reforming catalysts / J.D.S. Lisboa, D.C.R.M. Santos, F.B. Passos, F.B. Noronha, *Catalysis Today*, 101 (1), 15-21.
8. Xu, J. (2009) Effect of boron on the stability of Ni catalysts during steam methane reforming / J. Xu, L. Chen, K.F. Tan et al. // *J. Catalysis*, 262 (2), 158-165.
9. Levalley, T.L. (2014) The progress in water gas shift and steam reforming hydrogen production technologies / T.L. Levalley, A.R. Richard, M. Fan. *International journal of hydrogen energy*. 39, 16983-17000.
10. Yang, X. (2016) Characterization and performance evaluation of Ni-based catalysts with Ce promoter for methane and hydrocarbons steam reforming process / X. Yang, J. Da, H. Yu, H.Wang. *Fuel*. 179 (1), 353-361. URL: www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236116301533?via%3Dihub (date accessed: 20.11.2025).
11. Antropova, K. Effect of citric acid quantity on LaAlO₃ formation in sol-gel synthesis with combustion / K. Antropova, R. Kuzmin, N. Alexandrova, A. Yurgin, J. Malyutina, N. Burkhinova // *Chimica Techno Acta*. –2025. – 12 (2). – 12201. – P. 1-11.

©Андреева Е. А., Смоленов А. Е., Попова Ю. В., Карасева И. Н., 2025

РОЛЬ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ДИАГНОСТИКЕ И ПРОФИЛАКТИКЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ

студент **Гареева Софья Тимуровна**,
доцент **Сандаков Виталий Дмитриевич**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Исследование внедрения технологий искусственного интеллекта для перехода от ручного устранения аварий к прогнозированию отказов в электросистемах. Рассматриваются существующие методы диагностики и профилактики на основе машинного обучения. Проанализирована экономическая эффективность внедрения современных систем на существующих предприятиях. Результатами внедрения искусственного интеллекта является снижение затрат на ремонт в среднем на 15 %.

Ключевые слова: искусственный интеллект, энергосистемы, машинное обучение, диагностика, профилактика, SCADA-системы, компьютерное зрение.

THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE DIAGNOSTICS AND PREVENTION OF FAILURES IN ELECTRIC GRIDS

Student **Gareeva Sofya Timurovna**,
Associate Professor **Sandakov Vitaly Dmitrievich**,
Kazan State Energy University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. A study on the implementation of artificial intelligence technologies to transition from manual troubleshooting to failure prediction in electrical systems. Existing diagnostic and preventative methods based on machine learning are examined. The cost-effectiveness of implementing modern systems at existing facilities is analyzed. The implementation of artificial intelligence results in a 15% average reduction in repair costs.

Keywords: artificial intelligence, power systems, machine learning, diagnostics, prevention, SCADA systems, computer vision.

В современном мире особое значение играет обеспечение надежности работы электросетей, поскольку с внедрением современных информационных технологий повысилось потребление электроэнергии. Неисправности в сетях приводят к угрозам безопасности человека, снижению времени и мощности работоспособности электроприборов, от которых зависит вся человеческая жизнь, а также неизбежные экономические потери на производствах. Существующие методы диагностики и профилактики в настоящее время

становятся недостаточно эффективными и точными для предотвращения энергетических сбоев на производстве. Внедрение искусственного интеллекта поможет повысить эффективность обслуживания электросетей.

Искусственный интеллект может автоматически при поступлении больших объемов данных проводить их анализ с высокой точностью. Также он имеет преимущество перед человеческими факторами, такими как болезнь, усталость, личные неприятности, рассеянность и тому подобные факторы, плохо сказывающиеся на работе по контролю сетей и быстрому выявлению и устранению неисправностей. Благодаря машинному обучению становится доступна новая обработка информации, которая может заранее выявить возможные сбои в электросети и предотвратить аварию.

Внедрение современных информационных технологий способствует созданию «умных» электросетей, способных самостоятельно анализировать и оптимизировать свою работу [1]. Это важно, поскольку сейчас стараются использовать более надежные и экологичные источники энергии. При этом к ним повышаются требования безопасности и стабильности электроснабжения.

Эффективность внедрения алгоритмов искусственного интеллекта зависит от качества, количества и актуальности исходных данных. Современная электросеть имеет большие массивы разнородных данных, с которыми работают несколько систем. В настоящий момент диагностика неисправностей опирается на данные с SCADA систем и устройств релейной защиты, используя импедансный расчет для локальных повреждений и экспертный анализ для интерпретации произошедшего события. Данные в SCADA системах передаются непрерывными потоками информации о текущих параметрах сети, таких как: значения токов, напряжений, мощности и частоты аппаратов. Этот подход отработан долгими годами, однако он имеет некоторые недостатки. К наиболее значимым недостаткам относятся: невысокая точность, уязвимость к кибератакам, проблемы с интеграцией устаревших систем, высокая стоимость обновлений и зависимость от человека, который за этим следит. Существуют также устройства релейной защиты и автоматики, которые фиксируют информацию о переходных электромагнитных процессах, сопровождающих короткое замыкание. Записи с данных устройств помогают быстро и с высокой точностью найти место повреждения и выявить причину и характер неисправности. Данные с устройств релейной защиты являются ключевыми для диагностики и устранения неполадок на электросетях. Помимо релейной защиты существует устройство точного измерения фазных величин, которое определяет амплитуду напряжения и силы тока с очень высокой точностью на всем участке энергосистемы в настоящий момент. Данные обновляются каждую минуту, что увеличивает шанс быстрого обнаружения и своевременного исправления аварийной ситуации. Также существуют различные специализированные системы мониторинга оборудования, такие как: анализ газов, данные о частичных разрядах, данные тепловизионного контроля. Они регулярно исследуют состояние критически важного оборудования, которое не должно выходить из строя.

Для внедрения систем искусственного интеллекта нужно для начала

определить, что машинные технологии будут анализировать без участия человека и в каких случаях чаще всего происходят поломки на энергопредприятиях [2]. Выделяют ряд наиболее частых неисправностей и аварий: короткое замыкание, обрыв провода в следствие погодных условий, перегрузка, нарушение изоляции, повреждение опор и проводов, перегрев оборудования и контактов, устаревание проводов или оборудования [3]. Некоторые из них возникают внезапно и требуют немедленного устранения проблемы, а некоторые развиваются долгое время и есть время для анализа неисправности и принятия соответствующих действий по предотвращению аварии.

Для успешного внедрения систем искусственного интеллекта на электропредприятие поступаемые данные следует подготовить к анализу: очистить лишние данные, привести к единым стандартам для правильного расчета, объединить все данные из разных источников, приходящих на предприятие, присвоить каждому входному параметру класс неисправности. Обеспечение подготовленных данных является хорошим условием для создания успешно работающей инфраструктуры на базе машинного обучения.

Быстрая и эффективная диагностика неисправностей является основной задачей для снижения времени простоя и сбоев электросетей, а также предотвращение развития аварийных ситуаций [4]. Системы искусственного интеллекта помогают автоматизировать процесс наблюдения за показаниями сети и повысить точность процесса обнаружения и устранения повреждений.

Методы, которые можно применить к электросетям: обучение с учителем, глубокое обучение. Методы машинного обучения с учителем заключаются в обучении модели на данных, где уже известен правильный ответ, что позволяет искусственному интеллекту запомнить все возможные состояния и их исходы и в будущем, применяя свои знания, решать возникающие проблемы в реальной жизни. Такая модель должна научиться предсказывать правильный ответ исходя из ранее полученных знаний. В сетях данный метод может быть полезен в случаях короткого замыкания, он может научиться определять место аварии и тип короткого замыкания. Метод глубокого обучения заключается в создании множества слоев для машины, которые позволяют компьютеру самостоятельно извлекать сложные закономерности из данных, подобно работе мозга человека. В сетях могут применяться для анализа токов и напряжения, а также для анализа динамики развития аварийного режима, что позволяет определить его развитие, например, переход из одной фазы в другую. Что касается выявления внешних проблем, здесь можно использовать технологии компьютерного зрения, которые могут помочь в визуальном осмотре труднодоступных и опасных мест электросистемы, например, обнаружение треснувших изоляторов, обгоревших контактов, обрыва и провиса проводов, коррозии оборудования, вандальных повреждений. Тепловизоры совместно с информационными технологиями могут помочь выявить участок перегретых проводов. Модели можно задать нормальное значение, с которым она будет сравнивать текущую ситуацию по всей территории сети и сигнализировать о возможных расхождениях данных.

Внедрение искусственного интеллекта имеет множество преимуществ для предприятий электросистем. К самым важным можно отнести: скорость реакции и точность анализа; автоматизация процесса анализа, что позволяет снизить нагрузку на рабочих и исключить возникновение ошибок, допускаемых человеком; возможность обрабатывать информацию сразу с тысяч датчиков и камер слежения по территории нахождения всей сети; технологии компьютерного зрения позволяют отслеживать установки и оборудования в труднодоступных местах и предотвращать возможные аварии, выявляя заранее дефекты сети.

Наиболее эффективным является внедрение предиктивного обслуживания, который представляет собой комплексный подход к управлению оборудованием, использующий сбор и анализ данных в реальном времени для прогнозирования отказов и определения оптимального времени для технического обслуживания [5]. Вместо обслуживания оборудования по графику этот метод позволяет выполнять работы только когда это экономически целесообразно и технически необходимо. Данный метод позволяет отойти от обслуживания по регламенту или по факту выявления неисправности к обслуживанию оборудования по их фактическому состоянию, предотвращая аварийное состояние. Основной задачей данного метода является оценка остаточного срока службы самых важных объектов, выход из строя которых может повлечь за собой серьезные затраты на ремонт и долгий простой в работе оборудования. Например, при прогнозировании на основе анализа газов в трансформаторном масле алгоритмы искусственного интеллекта позволяют существенно повысить уровень точности проведенной диагностики, поскольку традиционные методы нередко выдают ложные результаты. Также при прогнозировании механического износа выключателей интеллект будет анализировать данные о времени срабатывания, сигналах, числе проведенных операций и предсказывать необходимость технического обслуживания или замены до того, как произойдет отказ.

Второй наиболее значимой задачей является предсказание рисков возникновения аварийных режимов, связанных с перегрузкой элементов электросети. Для этого анализа можно внедрить системы прогнозирования нагрузки либо системы анализа статистической и динамической устойчивости. Для прогнозирования хорошо подойдут гибридные модели искусственного интеллекта, которые могут учитывать не только историю потребления электричества, но и обращать внимание на дни недели, внешние воздействующие факторы, такие как атака извне или изменение температурного режима в окружающей среде. При анализе статистической и динамической устойчивости больше подойдет глубокое обучение нейронной сети, способное за несколько секунд оценить риск возникновения аварийной ситуации, что в настоящее время является практически невозможной задачей при работе над этим человеком, так как он не может настолько же быстро проанализировать большое количество данных в реальном времени.

Самым эффективным является создание и внедрение «Цифрового двойника» [6]. Он представляет собой виртуальную динамическую модель

реальной системы или какого-либо ее отдельного компонента по необходимости. На цифровой двойник непрерывно подается информация с датчиков, непрерывно отражая актуальную информацию о состоянии объекта, но в уменьшенном, удобном для восприятия и быстрого анализа размере. На такой модели можно самому учиться исправлять возможные аварийные ситуации, при этом ничего не меняя на самом объекте электросети. Человек может попробовать смоделировать несколько ситуаций и попробовать разрешить их, наиболее быстрый и удачный способ можно будет потом использовать в реальной жизни при необходимости. Также с помощью цифрового двойника можно заранее замечать неисправности в сети и предотвращать их до наступления аварийной ситуации.

Внедрение систем искусственного интеллекта требует изначально больших затрат, однако они оправдывают себя в долгосрочной перспективе: сокращаются затраты на ремонт оборудования, увеличивается срок службы оборудования, снижаются доходы предприятия из-за отсутствия простоев подачи электричества, оптимизируется процесс работы ремонтных служб.

В ходе проведения исследования были найдены крупные компании, работа которых после внедрения нейронных сетей стала эффективнее. Например, в крупной сетевой компании в Европе после разработки и внедрения облачной платформы, аккумулирующей данные исторических и текущих замеров, данных о нагрузке и температуре окружающей среды модель не только классифицирует тип дефекта, но и вычисляет индекс состояния трансформатора. За первый год было предсказано и устранено 2 отказа трансформаторов, что позволило сократить несколько миллионов евро на ремонт оборудования. Следующим примером является Горская электросетевая компания, где разработали модель, которая в качестве входных данных использует историю нагрузок, прогноз погоды и учитывает дни недели. Внедрение системы помогло снизить среднеквадратичную ошибку прогноза часов нагрузки на сутки вперед на 1,7 %. На основе более точных данных специалисты смогли заранее осуществлять переключение для выравнивания нагрузки и избежания перегрузки на электросетях. Это доказывает, что внедрение современных технологий являются успешной практикой на сегодняшний день.

Искусственный интеллект открывает новые возможности для трансформации электроэнергетики, обеспечивая переход от реагирования к быстрым действиям. Технологии машинного обучения и компьютерного зрения позволяют быстро и с высокой точностью диагностировать возможные повреждения, прогнозировать состояние оборудования и автоматизировать мониторинг сетевой инфраструктуры.

Быстрое развитие интеллектуальных систем станет важным фактором создания устойчивого и экономически эффективного будущего в сфере электросетей, требующего комплексного подхода к технологическим изменениям.

Список литературы:

1. Отуазохор, П. О. Обнаружение многоклассовых неисправностей в системах управления электросетями с использованием данных РМУ уровня передачи / П. О. Отуазохор, Я. А. Бекенева, Ч. Д. Эзе, А. И. Адейе // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. – 2025. – Т. 1. – С. 142-146.
2. Нигъматуллина, А. В. Мониторинг и анализ качества электросетей при помощи искусственного интеллекта / А. В. Нигъматуллина // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии: Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции молодых ученых, Альметьевск, 20 декабря 2023 года. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2023. – С. 645-648.
3. Хабибрахманова, А. И. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024662782 Российская Федерация. Обнаружение и классификация электрических неисправностей: № 2024660997: заявл. 17.05.2024; опубл. 30.05.2024 / А. И. Хабибрахманова, Л. Д. Зинатова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».
4. Мельников, А. В. Защитное отключение как один из принципов безопасности техносферы / А. В. Мельников, И. А. Гущин // Процессы техносферы: региональный аспект: сборник материалов VII Всероссийской научно-практической конференции, Чебоксары, 25–26 марта 2024 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2024. – С. 66-73.
5. Иванюга, М. М. Обнаружение повреждений при осмотре воздушных линий электропередач с использованием искусственного интеллекта / М. М. Иванюга, Н. И. Яковенко // Вестник Брянской ГСХА. – 2025. – № 5(111). – С. 62-66.
6. Петров, А. В. Цифровые двойники - цифровые тени - цифровые двойники / А. В. Петров // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2024. – № 52. – С. 73-81. – DOI 10.51215/2411-6483-2024-52-73-81.

© Гареева С. Т., Сандаков В. Д., 2025

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАЮЩИХ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ

студент **Рожков Алексей Иванович**,
науч. руководитель: канд. физ.-мат. наук,
доцент **Никифоров Дмитрий Константинович**,
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
г. Калуга, Российская Федерация

Аннотация. В статье проводится сравнительный анализ конструкций летающих ветрогенераторов – воздушных ветроэнергетических систем (AWES). Рассматриваются два основных типа: аэростатные системы легче воздуха (на примере MARS, BAT) и крыльевые системы тяжелее воздуха (Kitemill, Makani). Выявлены ключевые преимущества, недостатки и перспективы применения каждой технологии. Показано, что системы легче воздуха перспективны для автономного энергоснабжения, в то время как системы тяжелее воздуха обладают большим потенциалом для масштабирования и интеграции в энергосистему.

Ключевые слова: летающие ветрогенераторы, высотная ветроэнергетика, системы легче воздуха, системы тяжелее воздуха, эффект Магнуса, привязные аэростаты, кайт-генераторы.

COMPARATIVE ANALYSIS OF VARIOUS DESIGNS OF FLYING WIND TURBINES

Student **Rozhkov Alexey Ivanovich**,
Academic Advisor: PhD in phys-mathem,
Associate Professor **Nikiforov Dmitry Konstantinovich**,
Kaluga Branch of the Federal State Autonomous Educational Institution of
Higher Education «Bauman Moscow State Technical University»,
Kaluga, Russian Federation

Abstract. The article provides a comparative analysis of the designs of flying wind turbines – aerial wind energy systems (AWES). Two main types are considered: lighter-than-air balloon systems (for example, MARS, BAT) and heavier-than-air wing systems (Kitemill, Makani). The key advantages, disadvantages and application prospects of each technology are revealed. It is shown that lighter-than-air systems are promising for autonomous power supply, while heavier-than-air systems have great potential for scaling and integration into the energy system.

Keywords: flying wind turbines, high-altitude wind power, lighter-than-air systems, heavier-than-air systems, Magnus effect, tethered balloons, kite generators.

Воздушные ветроэнергетические системы (Airborne Wind Energy Systems,

AWES), способные утилизировать огромный потенциал высотного ветра в промышленных масштабах, открыли новую страницу в ветроэнергетике. В качестве несущих устройств AWES предлагается использовать весь спектр летательных аппаратов легче и тяжелее воздуха: воздушные змеи, аэростаты, планеры, мультикоптеры и другие. Кинетическая энергия ветра на высоте может использоваться напрямую в виде тяги или преобразовываться в электроэнергию и передаваться на наземную станцию посредством проводящих кабелей.

Целью данной работы является сравнительный анализ конструкций AWES для выявления преимуществ и недостатков каждого типа, а также оценка перспектив применения летающих ветрогенераторов в России. Данное направление выработки электроэнергии зародилось недавно и пока не нашло массового применения, но обладает большим потенциалом для развития.

Первыми, кто предложил ловить ветер, не опираясь на землю, там, где скорости ветра выше, а турбулентность сведена к минимуму, были советский учёный Б. Б. Кажинский и русский изобретатель-самоучка А. Г. Уфимцев. Наблюдения над различными районами СССР показали, что при среднегодовой скорости ветра над землёй 4–5 м/с, скорости ветра на высоте 500 м достигают 9–10 м/с. Эта разница особенно заметна для срединных районов СССР и в меньшей степени на открытых побережьях. Кроме того, на высоте 500 м почти не наблюдалось воздушных течений со скоростью ниже 3 м/с, а периоды безветрия у поверхности занимали около 13 % времени в году. Ещё выше, до 1 000 м, скорость ветра дополнительно прирастала лишь на 10 % [1].

Для использования преимуществ высотного ветра на высоту 700 м предлагалось поднять привязной аэростат в виде роторного ветрогенератора типа Савониуса, «состоявшего из двух полых полуцилиндров, герметически закрытых, наполненных легким газом (водородом или гелием) и образующих зигзагообразный канал». В безветрие ветрогенератор будет находиться на высоте 700 м, при слабом ветре – 600–650 м, при номинальном ветре – 500 м, при буревом ветре – 250 м, а конструкция предусматривает всегда вертикальное положение оси вращения. Провода от электрогенератора, установленного на летающей раме, спускаются отдельным кабелем и наматываются на барабан одновременно с намоткой тяги аэростата.

Если первые концепции летающих ветрогенераторов держались на аппаратах легче воздуха, то вторую волну интереса к высотному ветру запустили американские инженеры Питер Пэйн и Чарльз Маккатчен. Они предложили, во-первых, использовать аппараты свободного полёта тяжелее воздуха (автожир, планер, параплан), во-вторых, использовать два способа генерации энергии: (1) работой винтомоторной группы в паре с электрогенератором на борту летательного аппарата, который зависает на тросе против ветра; (2) циклическими движениями летательного аппарата поперёк ветрового потока (характерное движение воздушного змея – кайта по кругу или восьмёркой) создавать тягу тросам, связанным с электрогенераторами, стоящими на земле. Движение поперёк ветра сопровождается повышением тяги удерживающего троса и скорости кайта на величину отношения подъёмной

силы к силе лобового сопротивления. Этой тяги достаточно для удержания кайта на высоте и выработки энергии.

Летающие ветрогенераторы можно разделить на два основных типа:

1. Аэростатные (дирижабельные) системы легче воздуха

Американский стартап Altaeros Energies Inc. покинул Массачусетский технологический институт с группой выпускников факультета аэронавтики и астронавтики в 2010 году с миссией создать первый в мире автономный аэростат. Первый такой аэростат SuperTower был выпущен ими в 2019 году. Но на стадии роста компания разработала концепцию летающего ветрогенератора на основе наполненного гелием привязного аэростата, получившего название Buoyant Wind Turbine (BAT). Наполненная газом оболочка BAT имеет форму пустотелого цилиндра, в полости которого установлено трёхлопастное ветроколесо с горизонтальной осью вращения. После испытаний ряда прототипов в 2014 году рынку была предложена модель BAT с заявленной мощностью 30 кВт.

С землёй BAT соединяют три троса: два удерживают и регулируют высоту, а один предназначен для передачи электроэнергии. В 2015 году работоспособность и надёжность BAT проверяли в 18-месячном испытании на площадке к югу от города Фэрбанкс, Аляска, финансируемом Управлением энергетики Аляски. Несмотря на кажущуюся эффективность, BAT не является альтернативой традиционным ветрогенераторам. Его назначение – обеспечить электроэнергией удалённые автономные районы. Кроме того, концепция BAT имеет трудности с масштабированием.

В 1987 году канадский инженер Фред Фергюсон с командой построили сферический дирижабль MAGNUS Airship, основанный на применении эффекта Магнуса. Совершенствуя и патентуя технологию дирижаблей, Фергюсон разработал прототип ветрогенератора, который также использует эффект Магнуса и может вырабатывать электроэнергию на большой высоте. В 2004 году для продвижения концепции ветрогенератора, получившего название MARS (Magenn Air Rotor System), Фергюсон основал компанию Magenn Power. MARS представляет собой наполненный гелием привязной вращающийся аэростат в форме ротора с горизонтальной осью вращения. Косые продольные лопасти, встречая ветер, вращают весь ротор вокруг оси, удерживаемой с земли тросами. Трансмиссия внутри оболочки передаёт вращение электрогенератору, а энергия по тросу поступает на землю. Эффект Магнуса, связанный с вращением ротора, обеспечивает дополнительную подъёмную силу, которая стабилизирует положение ротора, заставляя его тянуть вверх, уменьшая дрейф по ветру.

Впервые прототип MARS был успешно протестирован в апреле 2008 года. В 2009 году было анонсировано начало серийного производства летающих ветрогенераторов MARS номинальной мощностью 100 кВт.

Таблица 1. Общие конструктивные характеристики Magenn 100 kW MARS [2].

Параметр	Magenn 100 kW MARS
Номинальная мощность	100 кВт
Габариты аэростата	Диаметр = 13,7 м, Длина = 20,5 м, плюс высота «створчатой» лопасти 6,7 м
Объем оболочки	5 663 м ³ (приблизительно)
Транспортный вес	Менее 5 897 кг
Длина фала	• 228,6 м стандартно • До 457,2 м опционально
Стартовая скорость ветра	2,5 м/с
Рабочая скорость ветра (включение)	3,0 м/с
Номинальная скорость ветра	12,0 м/с
Максимальная рабочая скорость ветра (отключение)	24,0 м/с
Предельная скорость ветра	30,0 м/с
Диапазон рабочих температур	-40 °С до +45 °С
Генераторы	2 x 50 кВт
Варианты выходной электрической мощности (для автономных применений)	• 480 и 600 В перем. тока / 3-фазный / 60 Гц • 380 В перем. тока / 3-фазный / 50 Гц • Стабилизированный постоянный ток
Жизненный цикл	от 10 до 15 лет до капитального ремонта

Интересная деталь проекта: авторы говорят, что эффект Магнуса (возникновение поперечной силы при обтекании воздухом вращающегося цилиндра) оказывает на установку благоприятное воздействие: дополнительно повышает темп вращения ротора, а ещё – стабильность аппарата.

Так, при росте скорости ветра MARS стремится подняться выше, вместо того, чтобы прижиматься к земле, как делал бы простой воздушный шарик на привязи. Благодаря чему ветряку не требуется какого-то специального управления.

Изобретатели ветряка-аэростата говорят о большей эффективности системы (на 40-50 %), в сравнении с аналогами, о невысокой стоимости (в расчёте на ватт), о лёгкости транспортировки, монтажа и эксплуатации [3].

Преимуществами систем легче воздуха являются:

- 1) Лёгкий запуск летающего ветрогенератора и управления им.
- 2) Надёжность.

Недостатки:

- 1) Зависимость от гелия.
- 2) Ограниченная мощность и масштабируемость. Существуют конструктивные трудности с созданием крупных и мощных установок.

3) Высокая парусность и дрейф.

Перспективы их использования: обеспечение энергией удаленных, автономных объектов (метеостанции, научные базы), где их надежность и простота управления важнее высокой эффективности.

2. Крыльевые системы (воздушные змеи) тяжелее воздуха

Идея получения электроэнергии с помощью воздушных змеев возникла более сорока лет назад. В системе получения электроэнергии с помощью воздушных змеев (Kite Power System, KPS) используется планер, который крепится к земле с помощью верёвки или троса. Трос намотан на катушку, называемую барабаном, которая соединена с генератором. Когда воздушный змей летит, он создаёт подъёмную силу и тянет трос, который вращает барабан, вырабатывающий электричество. В системе KPS планер управляется таким образом, чтобы он двигался по траектории в форме восьмёрки или буквы «восьмёрка» и вырабатывал энергию. Траектория в форме восьмёрки предпочтительнее других траекторий, так как она вырабатывает больше энергии при боковом ветре и при этом трос не запутывается во время полёта. Система KPS работает в два этапа. На этапе выработки энергии петли в форме восьмёрки при боковом ветре создают максимальную подъёмную силу, которая вращает генератор и вырабатывает электричество. На этапе восстановления планер отключается и возвращается в исходное положение за счёт потребления части выработанной энергии. Метод отключения энергии заключается в том, чтобы увести воздушного змея от встречного ветра и вернуть его в исходное положение с минимальным потреблением энергии.

Основные преимущества KPS по сравнению с обычными ветряными турбинами заключаются в том, что они на 90 % сокращают количество строительных материалов и могут работать при более сильном ветре на большей высоте, где обычные ветряные турбины не могут функционировать. KPS могут вырабатывать больше энергии и быть более эффективными по сравнению с обычными ветряными электростанциями. Кроме того, системы AWES часто легче, компактнее и гибче обычных ветряных турбин, что упрощает их установку и делает их более подходящими для использования в удалённых или труднодоступных местах [4].

В декабре 2016 года был построен прототип-ветрогенератор M-600 мощностью 600 кВт в виде моноплана с размахом крыльев 25,4 м. Четыре пилон на передней кромке крыльев несли восемь крыльчатых ветродвигателей-винтов диаметром 2,3 м по пять лопастей каждый. 21 августа 2018 года M-600 совершил первый опытный полёт на испытательном полигоне площадью 260 га в восьми километрах от городского центра Ваммеа на Гавайи. Рабочая зона кайта определяется длиной троса. При испытательных полётах M-600 трос выпускали примерно на 430 м, что позволяло ему совершать полный круг за 10–25 с. Стартуя перпендикулярно ветру, M-600 набирает высоту, определяемую полётным контроллером. Роторы при взлёте работают на создание тяги. Перейдя в режим бокового ветра, M-600 летает, не потребляя энергии, автономно по кругу или петлями, выписывая восьмёрку, а роторы под ветром работают на генерацию электроэнергии [1].

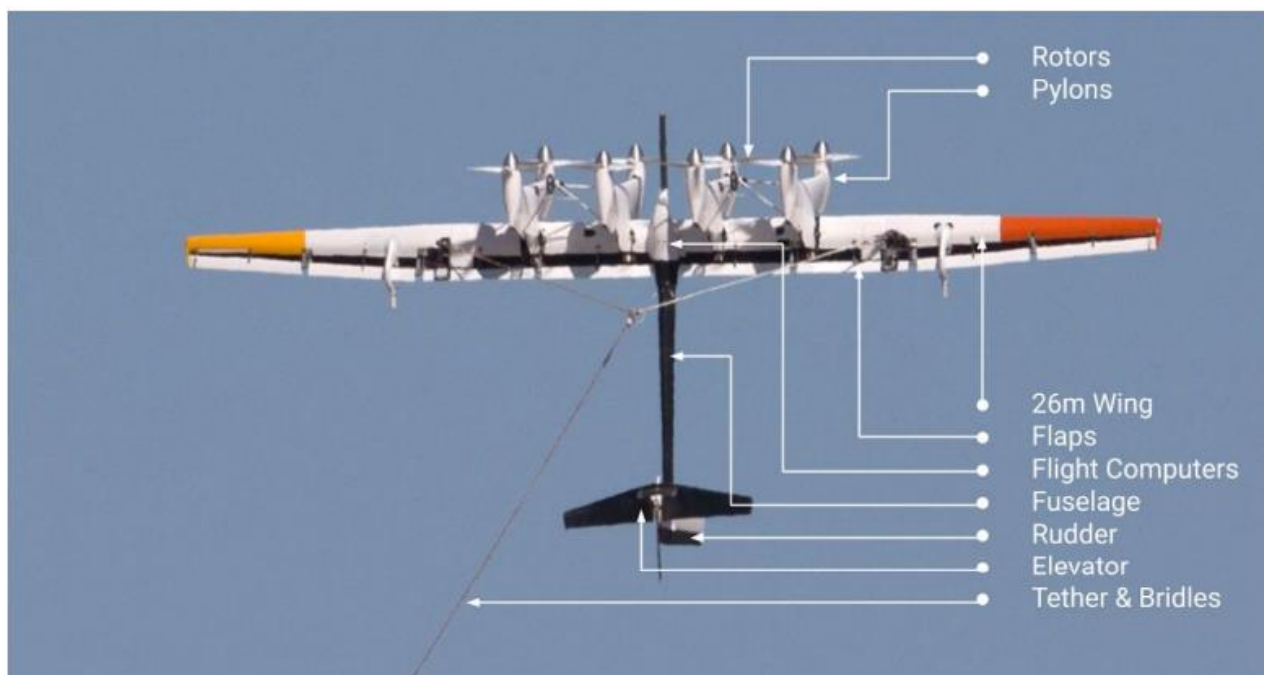


Рисунок 1. Компоненты летающего ветрогенератора M600 Energy Kite [5]

Таблица 2. Типичные значения эффективности компонентов для AWT с бортовой генерацией [5].

Переменная	Значение	Описание
η_{rotors}	0.8	Эффективность ротора: преобразование мощности тяги в мощность на валу
η_{motors}	0.94	Эффективность двигателя: преобразование мощности на валу в электрическую мощность
η_{ctrls}	0.96	Электрическая эффективность контроллера двигателя
η_{tether}	0.97	Электрическая эффективность линии передачи по фалам (тросу)
$\eta_{padtrans}$	0.975	Эффективность трансформатора в наземном комплексе
$\eta_{collection}$	0.97	Эффективность электрической системы сбора энергии
η_{t2g}	~0.66	Суммарная эффективность преобразования от тяги до сети

Норвежская технологическая компания Kitemill AS была основана в 2008 году для разработки AWES на больших высотах 500–1500 м. Концепция летающего ветрогенератора Kitemill представляет собой кайт в виде самолёта с двумя гондолами по два винта на каждой, один – тянущий, второй – толкающий. Концепция была оценена Det Norske Veritas (DNV-GL) в 2010 году,

и был сделан вывод о её осуществимости. Первый коммерческий заказчик на пять установок появился только в 2015 году. К 2019 году удалось решить проблему с навигационной системой. В настоящее время компания эксплуатирует небольшой прототип с размахом крыла 3,8 м, подключённый к наземной станции мощностью 5 кВт. Посадочная платформа позволяет планеру состыковаться и приземлиться. Лебедка установлена в постройке, которая также используется как оперативный центр с рабочими местами на 5 человек.

В настоящее время идут работы по масштабированию прототипа до опытной установки, которая должна работать непрерывно, возвращая энергию в сеть. Это будет планер с размахом крыльев 7,5 м мощностью 30 кВт. Вырабатывая энергию, планер вытягивает трос со скоростью, равной 1/3 скорости ветра. Затем он летит по спиральной траектории, словно концевая часть лопасти ветроколеса, извлекая энергию ветра, проходящего внутри описываемой окружности. Когда трос начинают травить, изменяется угол атаки и лобовая площадь, и возвращение планера происходит быстрее. Активная фаза генерации составляет 90 %, а холостой ход (возвращение) – 10 % времени полёта. Генерация электроэнергии начинается при скорости ветра 5 м/с. Максимальная, она же номинальная, мощность 30 кВт достигается при ветре 12 м/с.

Основные элементы летающего ветрогенератора Kitemill:

Планер

Планер – это специально сконструированное летательное средство, изготовленное из композитных материалов. Он имеет жёсткую конструкцию и рассчитан на эксплуатацию при сильном ветре. Оснащён 4 пропеллерами, которые нужны только для взлёта и посадки. Поднявшись в воздух, планер остаётся на высоте, плавно скользя по воздушным потокам. Воздушный змей сконструирован таким образом, чтобы он мог быстро и легко перемещаться, создавая при этом высокое тяговое усилие на тросе.

Трос

Воздушный змей соединён с землёй тросом. Этот трос передаёт силу натяжения от планера к генератору наземной станции. Он изготовлен из плетёных полиэтиленовых волокон, выбранных за их уникальную прочность. Благодаря этому трос имеет наименьший диаметр, что является важным фактором для получения энергии от воздушных турбин. Материал троса долговечен и может выдерживать различные условия окружающей среды, такие как воздействие влаги и ультрафиолетового излучения.

Наземная станция

Наземная станция преобразует тяговую силу троса в электричество. Это электричество, в свою очередь, поступает в электросеть. Лебедка, расположенная на наземной станции, подключена к генератору, который наматывает и разматывает трос воздушного змея. Система управления также находится на наземной станции и обеспечивает безопасное и эффективное выполнение всех полётов. Она контролирует воздушного змея и лебедку, обеспечивая оптимальное производство энергии. Датчики, установленные на летательном аппарате, предоставляют системе управления данные для

управления и балансировки летательного аппарата. Система управления обеспечивает автономную работу всего комплекса Kitemill и последующее производство энергии [6].



Рисунок 2. Летающий ветрогенератор Kitemill [6]

Преимуществами систем тяжелее воздуха являются:

- 1) Маленький расход материалов. Не требуются дорогостоящие газы и прочные оболочки для удержания летающего ветрогенератора в воздухе.
- 2) Хорошая масштабируемость. Мощность эффективно наращивается за счет увеличения размаха крыла и оптимизации траектории полета.

Недостатки:

- 1) Сложная система управления. Требуем высокоточных алгоритмов для автономного полета по сложной траектории (восьмерка, спираль) в турбулентных условиях. Провал проекта Makani, несмотря на многомиллионные инвестиции, наглядно демонстрирует, что сложность управления является не теоретическим, а практическим барьером для коммерциализации этого типа AWES.
- 2) Сложность взлёта и посадки.
- 3) Цикличность работы. Есть фаза генерации (90 % времени) и фаза возврата (10 % времени).

Перспективы их использования: Потенциально способны заменить или дополнить традиционные ветряные турбины, особенно в глубоководных акваториях и труднодоступных регионах.

Как мы видим, преимуществами воздушной ветроэнергетики по сравнению с традиционной является рабочая высота, которая позволяет использовать более сильные и постоянные по направлению ветра, что позволяет устанавливать электростанции даже в тех местах, которые ранее считались бесперспективными. Вследствие постоянства ветра остается постоянной и вырабатываемая мощность таких электростанций, что приводит к падению нагрузок на резервные

генерирующие мощности и повышению коэффициента использования установленной мощности (КИУМ). Из-за низкой материалоемкости и повышения КИУМ стоимость киловатта выработанной энергии существенно сократится. Так как генераторы работают на большой высоте и имеют малый размах лопастей, при эксплуатации таких ветряных станций будет производиться меньше шума. Отсутствует загрязнение окружающей среды и потребление для выработки электричества сырьевых ресурсов. Недостатком же является малая вырабатываемая мощность электроэнергии [7].

Системы централизованного энергоснабжения покрывают лишь примерно 1/3 территории России, а на 70 % территории с населением около 20 млн человек энергоснабжение потребителей осуществляется преимущественно с помощью автономных энергоустановок, работающих на дорогом привозном жидком топливе или с использованием местных ресурсов (уголь, древесное топливо, торф и др.). Газифицировано лишь около 50 % городов и около 35 % сельских населённых пунктов. Из-за этого в России необходимо в первую очередь обратить внимание на разработку и создание систем автономного электро- и теплоснабжения потребителей. Именно в этой сфере энергоустановки на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ) уже сегодня в ряде случаев оказываются конкурентноспособными и могут обеспечить положительный экономический, социальный и экологический эффекты [8].

В отличие от обычных ветряных турбин, AWES может использовать более сильные и стабильные ветра на больших высотах, при этом значительно сокращая расход материалов и затраты на инфраструктуру. Такие системы обычно состоят из привязанного к земле летательного аппарата, соединённого с наземной станцией, где натяжение троса используется для приведения в действие генератора. Система AWES работает в два этапа: на этапе выработки энергии трос разматывается, вырабатывая электричество, а на этапе восстановления трос сматывается с минимальным потреблением энергии. Благодаря своей легкой и гибкой конструкции система AWES обладает рядом преимуществ, в том числе возможностью установки в удаленных или прибрежных районах, где установка традиционных ветряных турбин нецелесообразна. Однако коммерциализация системы AWES сопряжена с трудностями, в частности с разработкой эффективных механизмов управления для автономной работы, особенно в условиях турбулентного ветра. Эти трудности делают систему AWES перспективным, но сложным решением для развития устойчивых энергетических систем. Проведенный сравнительный анализ позволил установить, что системы легче воздуха BAT, MARS являются оптимальным решением для питания электроэнергией маломощных потребителей вдали от централизованного энергоснабжения, в то время как системы тяжелее воздуха Makani, Kitemill обладают большим долгосрочным потенциалом для того, чтобы стать новым типом электростанций, обладающих своими уникальными преимуществами. Наибольшие перспективы для внедрения AWES в России связаны с питанием автономных потребителей в труднодоступных условиях.

Список литературы:

1. Власов, В. К. Ветроэнергетические установки: монография / В. К. Власов. – Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 316 с. – ISBN 978-5-9729-0843-1.
2. Воздушно-роторная система Magenn (MARS) [Электронный ресурс] URL: https://lynceans.org/wp-content/uploads/2024/11/Magenn-Air-Rotor-System_MARS.pdf (дата обращения 15.11.2025).
3. Воздушный ротор от Magenn Power [Электронный ресурс] URL: https://art.thelib.ru/science/inventions/stranniy_korabl_perekinulsya_gelievoy_lovushkoy_dlya_vetra.html (дата обращения 15.11.2025).
4. Castelino, R.V., Kumar, P. & Kashyap, Y. Design and development of a ground-based kite steer controller for kite-based wind power generation. Electr Eng 107, 14633–14653 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00202-025-03284-4>.
5. Echeverri P., Fricke T., Homsy G., Tucker N. The Energy Kite Part 1 URL: https://storage.googleapis.com/x-prod.appspot.com/files/Makani_TheEnergyKiteReport_Part1.pdf (date accessed 11.11.2025).
6. Будущее «зелёной» энергетики высоко в небе [Электронный ресурс] URL: <https://www.kitemill.com/> (дата обращения 12.11.2025).
7. Онищенко, Р. А. Перспективы использования летающих ветрогенераторов в регионах, испытывающих нехватку электрической энергии / Р. А. Онищенко, Е. А. Кузнецов // Ростовский научный журнал. – 2017. – № 11. – С. 332-337.
8. Фортов, В. Е. Энергетика в современном мире: научное издание / В. Е. Фортов, О. С. Попель. – Долгопрудный: Интеллект, 2011. – 168 с.

© Рожков А. И., 2025

СОЗДАНИЕ ЕДИНОЙ ЦИФРОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

студент **Шарафиева Зулейха Фанисовна**,
науч. руководитель: ассистент **Любишев Алексей Анатольевич**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация.

Аннотация. В работе рассматриваются современные подходы к цифровизации энергетической отрасли и обосновывается необходимость разработки единой цифровой энергетической платформы. Анализируются существующие цифровые системы в энергосекторе, их функциональные возможности и ограничения. Предлагается концепция построения платформы, включающая многоуровневую архитектуру, интеграцию потоковых данных, применение цифровых двойников и интеллектуальных модулей прогнозирования.

Ключевые слова: цифровизация, энергетика, платформа, цифровой двойник, большие данные, управление энергосистемой.

CREATING A UNIFIED DIGITAL ENERGY PLATFORM

Student **Sharafieva Zuleikha Fanisovna**,
Academic advisor: assistant **Lyubishev Alexey Anatolyevich**,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The paper discusses modern approaches to the digitalization of the energy sector and substantiates the need to develop a unified digital energy platform. It analyzes existing digital systems in the energy sector, their functionality and limitations. A concept of platform construction is proposed, including a multi-level architecture, data-flow integration, digital twins and intelligent forecasting modules.

Keywords: digitalization, energy, platform, digital twin, Smart Grid, big data, energy system management.

Переход на единую цифровую энергетическую платформу становится необходимым, поскольку разрозненные цифровые решения больше не обеспечивают эффективное управление сложной и динамичной энергосистемой. Создание единого цифрового пространства позволяет интегрировать все технологические процессы, начиная от сбора телеметрии и заканчивая долгосрочным планированием развития сети. В рамках такой платформы информация перестаёт быть ограниченной отдельными предприятиями или участками сети: она становится доступной для анализа на

уровне всей энергетической инфраструктуры, что значительно улучшает качество управленческих решений [1].

Благодаря этому энергетическая компания получает постоянное, динамически обновляемое представление о состоянии сети. В едином цифровом контуре интегрируются данные от умных счетчиков, систем диагностики оборудования, автоматизированных подстанций, линий электропередачи и распределённых источников энергии. Такой подход не только увеличивает объем собираемой информации, но и позволяет выявлять взаимосвязи между процессами, которые ранее казались независимыми. Например, можно быстро учитывать влияние локальной генерации на сетевые режимы или анализировать, как изменения нагрузки в одном районе сказываются на соседних участках.

Одним из ключевых требований к цифровой платформе является её способность масштабироваться без необходимости перестраивать внутренние процессы. Это особенно важно в условиях быстрого роста числа пользователей, появления новых малых генераторов, расширения зарядной инфраструктуры и внедрения различных интеллектуальных устройств. Платформа должна гибко реагировать на эти изменения, сохраняя высокую производительность и оперативность работы, а также обеспечивать стабильность функционирования даже при резких нагрузках [2]. Модульная архитектура делает возможным плавное добавление новых сервисов и функций по мере необходимости от прогностической аналитики и систем мониторинга до цифровых двойников и автоматизированных средств управления. Кроме того, такая гибкость позволяет энергетическим компаниям быстро адаптироваться к новым технологическим решениям и изменяющимся условиям рынка, поддерживая высокий уровень эффективности и снижая риски простоев или ошибок в работе системы.

Не менее важным аспектом становится кибербезопасность. Энергетика относится к объектам критической инфраструктуры, и любое вмешательство в её работу может привести к серьёзным последствиям. Единая цифровая платформа создаёт возможность централизованного контроля за безопасностью, применяет единые стандарты защиты данных, обеспечивает постоянный мониторинг угроз и управление доступом. Это делает систему не только технологически продвинутой, но и защищённой от внешних и внутренних рисков. Архитектурно единая цифровая энергетическая платформа представляет собой многослойную и технологически насыщенную систему, в которой каждый уровень выполняет строго определённую функцию и одновременно взаимодействует с другими. В самом основании платформы расположен уровень сбора данных: именно здесь происходит первичное взаимодействие с оборудованием, сетевой инфраструктурой и интеллектуальными устройствами. К этому уровню относятся современные датчики IoT, интеллектуальные счётчики электроэнергии, устройства релейной защиты, системы мониторинга подстанций, линии электропередачи, генераторы и другие элементы оборудования. Каждый из этих источников передает

телеметрию, показатели напряжения, тока, частоты, температуры, вибрации, состояния изоляции, события, логи и множество других параметров. Важно, что данные собираются непрерывно и с высокой частотой, обеспечивая фактически «цифровой пульс» всей энергосистемы [3].

Полученная информация передается в платформу по защищённым каналам связи. Используются промышленные протоколы, обеспечивающие устойчивость к кибератакам, низкие задержки и надежность передачи. Защита данных является обязательной частью архитектуры, поскольку энергетические объекты относятся к критически важной инфраструктуре, и любые нарушения в работе могут иметь серьёзные последствия. Транспорт данных осуществляется с учетом требований к скорости, целостности и доступности, позволяя обеспечивать постоянный поток информации от сотен и тысяч устройств.

Следующим ключевым элементом платформы является централизованное хранилище данных. Оно формируется с учетом того, что энергетика генерирует огромные объемы информации. Для этого используются распределённые системы хранения, которые позволяют обрабатывать как структурированные данные показания приборов, отчёты, справочные сведения, так и неструктурированные видеопотоки, аудиосигналы, диагностические логи, исторические события. Хранилище выступает основой работы всей платформы: оно обеспечивает доступ к данным в режиме реального времени, поддерживает долговременное архивирование, позволяет выполнять сложные запросы и обеспечивает базу для аналитических инструментов.

На следующем уровне расположены аналитические сервисы, которые делают платформу действительно интеллектуальной. Здесь задействуются алгоритмы машинного обучения, методы математического моделирования, инструменты статистической обработки и полноценной прогнозной аналитики. Эти компоненты работают совместно, формируя многоуровневую систему анализа, способную не только интерпретировать текущие данные, но и строить глубинные взаимосвязи между различными параметрами оборудования и производственных процессов.

Используемые алгоритмы позволяют обрабатывать огромные массивы разнородной информации, выявлять устойчивые закономерности, классифицировать типичные и нетипичные сценарии поведения систем, а также определять значимые отклонения от нормального режима работы. На основе обнаруженных зависимостей формируются прогнозы, которые дают энергетической компании возможность заранее выявлять потенциальные аномалии в работе оборудования, прогнозировать пики нагрузки на сети, оценивать вероятность возникновения отказов и более эффективно распределять доступные мощности [4].

Особое значение имеет способность аналитики работать как в режиме исторического анализа, так и в режиме реального времени. Это обеспечивает постоянный мониторинг состояния энергосистемы и позволяет оперативно реагировать на изменения параметров, предотвращая аварийные ситуации,

сокращая вероятность простоя и повышая общую надежность инфраструктуры. В результате аналитические сервисы становятся ключевым звеном в создании устойчивой, предсказуемой и оптимизированной энергетической экосистемы.

Особое место в архитектуре занимают цифровые двойники, виртуальные модели оборудования, подстанций или даже целых сетевых участков. Цифровой двойник представляет собой точную математическую и логическую копию реального объекта, построенную на основе данных, поступающих с устройств. Такие модели позволяют проводить виртуальные эксперименты: анализировать последствия изменения режима работы, проверять устойчивость к аварийным ситуациям, рассчитывать оптимальные параметры и тестировать различные сценарии без риска для реальной системы. Цифровой двойник постоянно обновляется, так как получает данные в режиме реального времени, благодаря чему он отражает текущее состояние объекта с высокой точностью. Это делает его мощным инструментом для инженерных расчётов, планирования ремонтных работ и принятия стратегических решений.

Архитектура цифровой энергетической платформы объединяет в себе сбор данных, транспортировку, хранилище, аналитические инструменты и цифровые модели, формируя единую интеллектуальную среду, способную повысить эффективность, надёжность и управляемость всей энергосистемы. Созданная платформа открывает широкие функциональные возможности. Энергосистема становится полностью наблюдаемой в реальном времени: операторы получают актуальную информацию о состоянии объектов и параметрах сети [5]. Система автоматически прогнозирует аварийно опасные ситуации, что позволяет предотвратить повреждения оборудования и сбои в подаче электроэнергии. Управление нагрузками становится более точным и гибким за счет анализа больших массивов данных и интеллектуальных рекомендаций. Дополнительно повышается энергоэффективность, поскольку платформа помогает выявлять необоснованные потери, оценивать состояние оборудования и оптимизировать режимы работы. Существенно возрастает прозрачность процессов: информация становится доступной всем участникам энергорынка в необходимом объеме, что способствует повышению качества принятия управленческих решений.

Формирование унифицированной цифровой платформы в энергетическом секторе представляет собой ключевой этап в эволюции современной энергетики. Такая платформа гарантирует объединение информационных потоков, расширенные возможности управления, внедрение технологий искусственного интеллекта и цифрового моделирования, что в свою очередь увеличивает стабильность и продуктивность работы энергосистемы. Подобная инфраструктура служит фундаментом для трансформации в полностью интеллектуальную энергетику, создавая отказоустойчивую, адаптивную и понятную систему, отвечающую перспективным требованиям.

Список литературы:

1. Кричевский, П. Е. Умные сети (Smart Grid): цифровая трансформация электроснабжения / П. Е. Кричевский // Вестник науки. – 2025. – № 9 (90). – С. 645–649. – URL: <https://www.вестник-науки.pф/article/25765> (дата обращения: 20.11.2025). – Текст: электронный.
2. Волкова, И. О. Интеллектуальная энергетика в России: оценка существующего потенциала развития / И. О. Волкова // ЭКО. – 2016. – Т. 46, № 12. – С. 90–100. – URL: ecotrends.ru (дата обращения: 23.11.2025). – Текст: электронный.
3. Атаева, Г. И. Значение «умных» сетей / Г. И. Атаева, Г. Б. Муродова // Universum: технические науки. – 2022. – № 3 (96). – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13225> (дата обращения: 25.11.2025). – Текст: электронный.
4. Перспективы развития «умных» сетей // Энергия единой сети (EEPIR.ru). Спецвыпуск «Россети». – 2025. – № 3 (38). – URL: <https://eepir.ru/article/perspektivy-razvitiya-umnyh-setej/> (дата обращения: 25.11.2025). – Текст: электронный.
5. Сташко, В. И. Формирование и обеспечение реализации основных технологических и научных приоритетов в целях инновационного развития в электроэнергетике / В. И. Сташко // Интеллектуальная энергетика — 2022: сборник материалов конференции. — 2022. — URL: <https://mceor.ru/2022/22022/130.html> (дата обращения: 29.11.2025). — Текст: электронный.

© Шарафиева З. Ф., 2025

РАЗБОР ВАРИАНТОВ ИСПОЛНЕНИЯ И ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВВОДА РЕЗЕРВА

аспирант **Кравчук Артём Алексеевич**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент **Доманов Виктор Иванович**,
Ульяновский государственный технический университет,
г. Ульяновск, Российская Федерация

Аннотация. В данной работе приводится разбор конструкции, правила работы и виды систем автоматического ввода резерва (АВР) как основного компонента промышленной автоматизации. Описаны методы контроля показателей электросети, условия перехода питания нагрузки на запасные источники энергии. Разобраны варианты архитектуры АВР, с учетом силовой и логической части. Дан обзор обычных схемных подходов, включая варианты на два и три входа, варианты с разделением шин, особенности выполнения отсроченного и последовательного пуска дизель-генераторных установок (ДГУ).

Ключевые слова: автоматический ввод резерва, резервный источник питания, дизель-генераторная установка, электросеть, схема.

ANALYSIS OF EXECUTION OPTIONS AND APPLICATION FEATURES OF AUTOMATIC RESERVE ENTRY SYSTEMS

PhD Student **Kravchuk Artem Alekseevich**,
Academic Advisor: PhD in Technology, Associate Professor
Domanov Victor Ivanovich,
Ulyanovsk State Technical University,
Ulyanovsk, Russian Federation

Abstract. This paper provides an analysis of the design, operating rules and types of automatic reserve input (AVR) systems as the main component of industrial automation. The methods of monitoring the indicators of the power grid, the conditions for switching the load supply to spare energy sources are described. The variants of the AVR architecture are analyzed, taking into account the power and logical parts. An overview of the usual circuit approaches is given, including two- and three-input options, split-bus options, and features of delayed and sequential start-up of diesel generator sets.

Keywords: automatic reserve input, backup power supply, diesel generator set, power grid, circuit.

Автоматический ввод резерва (АВР) выступает в роли аппарата промышленной автоматизации, осуществляющего автоматическое переключение к питанию от запасных источников энергии [1]. При

обнаружении отклонений характеристик в главной сети система АВР производит коммутацию нагрузки к альтернативным источникам.

Альтернативным источником может выступать дизель-генераторная установка либо бензиновый генератор, аккумуляторная батарея. В преобладающем числе случаев наличие альтернативного источника у потребителей первой категории является обязательным условием (оснащение автономными источниками питания) [2]. Необходимо отметить, что в сценариях, где потребитель причисляется к первой особой категории, устанавливается условие наличия трех либо большего количества альтернативных источников питания.

Главное назначение, которое выполняет АВР, состоит в гарантировании бесперебойной эксплуатации потребителей. Для достижения этой цели системе АВР требуется отслеживать состояние линии, обеспечивающей подачу энергии. При фиксации аварийного режима система АВР проводит коммутацию нагрузки к альтернативному вводу. С учетом требований, предъявляемых к электропитанию промышленных предприятий, данная процедура должна производиться с предельной оперативностью. Критическим условием является единичность проводимого переключения, обусловленная необходимостью ограничения повторных срабатываний при аналогичных дефектах питания. Необходимо отметить, что при этом деактивация главной сети должна реализовываться до активации альтернативной линии. О процедуре коммутации система АВР уведомляет посредством индикаторов [3].

Параметры рабочего напряжения задаются оператором. При любых нарушениях от заданных параметров автомата выдает сигнал на коммутацию ввода. Такими нарушениями могут быть короткое замыкание, разрыв сети, падение напряжения, несоответствие фаз либо превышение напряжения. При этом система АВР управляет выполнением ряда вспомогательных операций [4]. До проведения коммутации нагрузки система АВР должна подтвердить готовность альтернативной шины питания через наличие на ней напряжения. Деактивация системой АВР главного ввода и активация альтернативного источника реализуется исключительно при выполнении всех критериев. После этого эксплуатация системы АВР может осуществляться по двум вариантам. Эксплуатация ведется от альтернативного источника, если оба ввода равнозначны. При стабилизации напряжения на главном вводе проводится обратная коммутация.

Технически система АВР включает коммутационную и логическую составляющие [5]. Первая компонента реализует коммутацию на практике, то есть исполняет роль физической коммутации, а вторая исполняет роль системы контроля. Целесообразно рассмотреть компоненты АВР более детально, поскольку у системы контроля (СК) имеется несколько задач. Как в главной, так и в запасной сети размещены измерительные сенсоры. Для определения нижней и верхней границ рабочего напряжения уставка измерительной компоненты корректируется. Измерительная компонента непрерывно отслеживает соответствующий ввод.

Задержка активации логического контроллера также корректируется [6]. Посредством указательных реле воплощена еще одна ключевая роль АВР – сигнальная либо индикаторная. Уведомляя обо всех дефектах и модификациях в системе, она исполняет защитную роль АВР.

Силовая компонента может воплощаться на автоматических выключателях либо контакторах. Независимо от выбора должна воплощаться блокировка параллельного включения обеих сетей. Это достигается за счет применения механической и электронной блокировок.

Подбор адекватной схемы – это сложный и значимый аспект в конструировании системы АВР. В этом случае все определяется конкретной задачей. Тем не менее сформированы типовые схемы, различающиеся количеством вводов и видом применяемого запасного источника.

На рисунке 1 изображена схема автоматического ввода резерва на два ввода. Это базовый метод конструирования схемы автоматического ввода резерва, для воплощения которой нужны два автоматических выключателя либо контактора. Для конструирования схемы в трехфазной сети требуется реле контроля фаз. Принцип функционирования автоматического ввода резерва на два ввода не характеризуется повышенной трудностью. Электрический ток проходит в нормальном режиме через один из вводов. При появлении аварии контакт на данном вводе размыкается и замыкается на втором. При возобновлении напряжения на первом вводе происходит обратная операция. Статус предпочтения первого ввода – специфика конструирования данной системы.

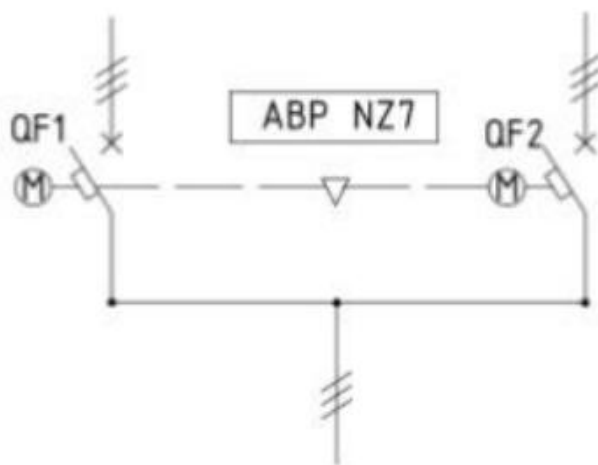


Рисунок 1. Схема автоматического ввода резерва на 2 ввода

На рисунке 2 показана схема АВР на два ввода с секционированием. Этот вариант нужен, когда нагрузка делится между двумя сетями. Первый ввод питает одну секцию, второй ввод – другую.

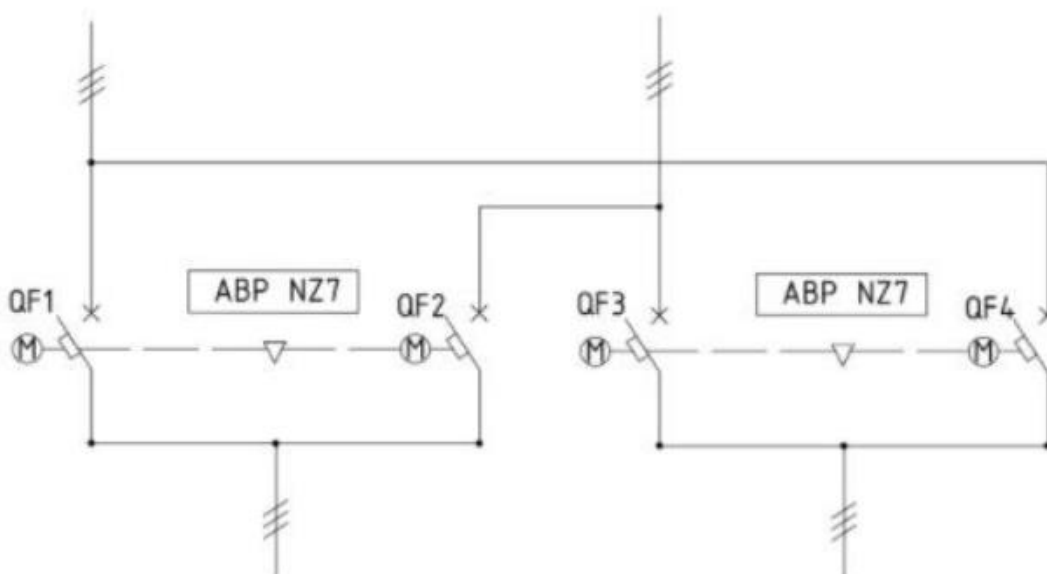


Рисунок 2. Схема автоматического ввода резерва на два ввода с секционированием

Отличительная особенность данной схемы — равнозначность обоих вводов. Для построения системы применяются секционный выключатель и два автоматических выключателя. При срабатывании автомата на первом вводе происходит запитывание отключенной секции через секционный выключатель от второго ввода. Каждая из секций будет питаться от своего ввода при возобновлении штатной работы.

На рисунке 3 представлена схема АВР на три ввода. При отказе основного источника производится коммутация на второй ввод. При отсутствии напряжения на втором вводе задействуется третий источник. Топология схемы вариативна и зависит от типа источников. Конфигурация «сеть-сеть-генератор» подразумевает два равнозначных сетевых ввода и один резервный (ДГУ). Конфигурация «сеть-генератор-генератор» представляет собой каскадную схему с одним основным и двумя последовательными резервными источниками.

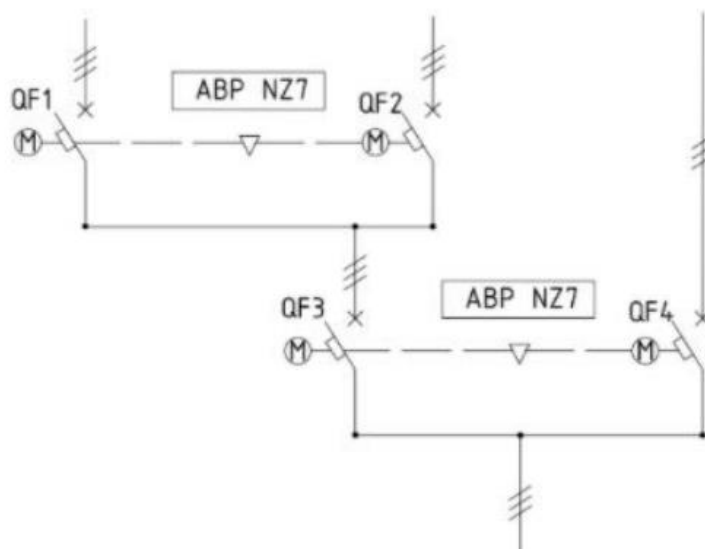


Рисунок 3. Схема автоматического ввода резерва на 3 ввода

Описанная система может модифицироваться, например, в схему с отложенным запуском ДГУ. Реализация требует применения программируемого логического контроллера (ПЛК) для введения временной задержки коммутации. Это необходимо для стабилизации выходных параметров генератора (частоты и напряжения) после запуска и выхода на номинальный режим работы.

Для систем высокой мощности, использующих несколько ДГУ, применяется схема АВР на четыре ввода с каскадным запуском. Под каскадным запуском понимается последовательный ввод генераторных установок в работу с заданными временными интервалами. Данный алгоритм предотвращает возникновение сверхтоков при одновременном пуске и критическую просадку напряжения, обеспечивая корректный выход генерирующего оборудования на рабочий режим и стабильность питания потребителей.

Список литературы:

1. Марашкин, В. А. Обеспечение бесперебойного электроснабжения с помощью устройств автоматического ввода резерва / В. А. Марашкин // Главный энергетик. – 2012. – № 2. – С. 28–30.
2. Алексеев, М. В. Решения по автоматическому вводу резерва / М. В. Алексеев // Научные вести. – 2022. – № 2(43). – С. 179–205.
3. Иманалиева, Б. М. Устройство автоматического ввода резерва / Б. М. Иманалиева, Д. А. Кузнецов // Актуальные проблемы науки и техники – 2015: Материалы VIII международной научно-практической конференции молодых ученых, Уфа, 16–18 ноября 2015 года. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2015. – С. 106–108.
4. Орлов, Д. А. Автоматический ввод резерва. Принцип работы АВР / Д. А. Орлов // Развитие инструментов управления научной деятельностью: сборник статей международной научно-практической конференции: в 4 частях, Уфа, 18

мая 2017 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «ОМЕГА САЙНС», 2017. – С. 100-102.

5. Айтенова, А. Б. Построение системы автоматического ввода резерва / А. Б. Айтенова // Научно-исследовательский центр «Technical Innovations». – 2021. – № 7. – С. 124–127.

6. Пиминов, Ю. С. Автоматический ввод резерва на Owen PR110- 24.12Д.8Р / Ю. С. Пиминов // Инновационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Сборник трудов научно-практической студенческой конференции кафедры электротехники, автоматики и метрологии электроэнергетического факультета, Ставрополь, 13–14 декабря 2017 года. – Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, 2017. – С. 16–18.

© Кравчук А. А., 2025

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ОЦЕНКЕ РАБОТЫ ВЕТРОУСТАНОВОК С ПАРУСНЫМИ ЛОПАСТЯМИ

аспирант **Артемов Алексей Игоревич**,
магистрант **Котов Корней Михайлович**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент
Отрубьянников Егор Владимирович,

Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. В работе предлагается подход к оценке эффективности ветроустановок с парусными лопастями путём сочетания аналитических методов и имитационного моделирования. Показана перспективность таких лопастей для малой энергетики при низких скоростях ветра и необходимость учёта сложной аэродинамики. Использование экспериментально-численных данных позволяет формировать моделирующий комплекс (ветровой ресурс, аэродинамика, механико-электрическая подсистема, сценарный анализ). Модели позволяют сравнивать конфигурации и снизить объём испытаний, ориентируясь на годовую выработку и КПД.

Ключевые слова: ветроустановка, парусные лопасти, малая ветроэнергетика, аэродинамика, имитационное моделирование, CFD, вертикально-осевая ветроустановка.

USE OF SIMULATION MODELS IN ASSESSING THE OPERATION OF WIND TURBINES WITH SAILING BLADES

PhD Student **Artemov Alexey Igorevich**,
Master Student **Kotov Korney Mikhailovich**,
Academic Advisor: PhD in Technology, Associate Professor
Otrubyannikov Egor Vladimirovich
Russian State University named after A. N. Kosygin
Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper proposes an approach to evaluating the efficiency of sail-type wind turbines by combining analytical methods and simulation modeling. The potential of such blades for small-scale wind energy under low wind speeds is highlighted, emphasizing the need to account for their complex aerodynamics. Experimental and numerical data are used to form a modeling framework (wind resource, aerodynamics, mechanical-electrical subsystem, scenario analysis). The models enable configuration comparison and reduction of testing efforts, focusing on annual energy yield and efficiency.

Keywords: wind turbine, sail blade, small wind energy, aerodynamics, simulation modelling, CFD, vertical-axis wind turbine.

Развитие малой ветроэнергетики рассматривается как один из инструментов повышения энергетической автономности удалённых и распределённых потребителей. При этом во многих регионах мира характерен слабый и переменный ветровой ресурс, а также сложные условия обтекания (городская застройка, пересечённый рельеф), что снижает эффективность традиционных ветроустановок с жёсткими лопастями.

Одним из альтернативных конструктивных подходов являются ветроустановки с парусными лопастями, где рабочая поверхность представляет собой гибкий парус (текстиль, композиты на основе тканых материалов), воспринимающий ветровую нагрузку и изменяющий форму под действием потока. Подобные решения изначально развивались в контексте парусных ветроколёс и судовых парусных систем, но в последние годы рассматриваются и для стационарных установок малой мощности. Обзор современных ветровых установок отмечает устойчивый интерес к низкоскоростным системам, способным эффективно работать при скорости ветра менее 5-6 м/с, в том числе к парусным схемам [1].

При этом аэродинамика парусных лопастей существенно сложнее аэродинамики жёстких профилей: имеет место сильная трёхмерность течения, нестационарность, большие деформации поверхности и переход от «парусного» режима с преобладанием силы лобового сопротивления к режимам с заметной подъёмной силой. Для анализа таких объектов активно применяются численные методы (RANS/URANS, CFD), а также натурные эксперименты в аэродинамических трубах [3].

Цель данной работы показать, каким образом результаты аэродинамических исследований парусных лопастей могут быть интегрированы в контур имитационного моделирования работы ветроустановок, и продемонстрировать методический подход к оценке эффективности парусных ветроустановок при различных сценариях ветровой нагрузки и режимах эксплуатации.

Имеющиеся разработки в области парусных лопастей можно условно разделить на несколько групп: треугольные парусные лопасти малой мощности, парусные лопасти дуговой формы, комбинированные лопасти и парусные элементы для вертикально-осевых турбин. В работе [2] исследуют треугольные парусные лопасти в виде прямоугольного равнобедренного треугольника из парусной ткани, как в экспериментальных продувках, так и с помощью CFD-моделей в пакете ANSYS Fluent. В экспериментальной работе [3] определены зависимости коэффициентов подъёмной и лобовой силы от безразмерного угла атаки и числа лопастей в колесе. В численном исследовании [2] показано монотонное увеличение подъёмной и лобовой сил с ростом скорости набегающего потока в диапазоне малых скоростей ветра (2-14 м/с). В работе [5] предложено судовое устройство с дуговыми парусами, способное работать в режимах парусного движения и выработки электроэнергии. В аэродинамической трубе исследованы три варианта толщины дугового паруса, выявлен оптимальный вариант с точки зрения совокупной эффективности по тяге и выработке энергии.

В ряде исследований (в частности [6]) рассматриваются вертикально-осевые ветроустановки с дополнительными элементами – фиксированными лопастями, направляющими экранами, устройствами фокусировки потока, где часть поверхности фактически работает в «парусном» режиме (преимущественно на сопротивление). Обзор CFD-подходов для вертикально-осевых турбин подчёркивает, что добавление элементов, повышающих сопротивление в нужных секторах азимута, может улучшать пусковые характеристики и эффективность в низкоскоростном режиме. В русскоязычной литературе парусные лопасти упоминаются в обзорах малых ветроустановок как нетрадиционное, но перспективное решение для регионов с низкими скоростями ветра, где классические профилированные лопасти не обеспечивают приемлемую выработку [1].

Из анализа конструкций и публикаций можно выделить ключевые задачи, решаемые в отношении парусных ветроустановок:

1. Определение аэродинамических характеристик парусных лопастей: зависимости коэффициентов подъёмной и лобовой силы от угла атаки, деформации паруса, скорости ветра, толщины или величины «пузатости» паруса [2, 3].

2. Оценка эффективности ротора с несколькими парусными лопастями: подбор числа лопастей, радиуса ротора, конфигурации обода и системы натяжения парусов. [3].

3. Сравнение с жёсткими лопастями по коэффициенту мощности, пусковым характеристикам, устойчивости к порывам и турбулентности [6].

4. Интеграция в систему электроснабжения: анализ годовой выработки, коэффициента использования установленной мощности и экономической целесообразности в конкретных ветровых условиях [1].

Эти задачи естественным образом разделяются на две группы: аэродинамические исследования (уровень лопасти/ротора) и системная оценка работы установки во времени, для которой наиболее удобным инструментом становятся имитационные модели.

Для ветроустановок с парусными лопастями целесообразно выделить несколько уровней модели:

1. Аэродинамический уровень (уровень лопасти/ротора). CFD-модели (RANS/URANS) треугольной или дуговой парусной лопасти, дающие зависимости C_L , C_D от угла атаки, скорости потока, геометрических параметров [2, 3]. Упрощённые модели (например, таблицы или аппроксимации на основе полиномов), которые впоследствии используются в системной имитационной модели.

2. Уровень ротора и механической подсистемы. Расчёт крутящего момента и мощности ротора по известным коэффициентам и текущему азимутальному положению лопастей. Учёт инерции ротора, характеристик генератора, трансмиссии, потерь.

3. Системный уровень (энергосистема потребителя). Моделирование ветрового ресурса во времени (временные ряды скорости и направления ветра, роза ветров). Модель системы накопления и потребителей (аккумуляторы,

DC/DC и DC/AC-преобразователи, нагрузка). Сценарный анализ – изменение режима ветра, отказов, стратегий управления.

Результаты аэродинамических исследований используются для построения редуцированной модели ротора. На практике это может выглядеть так:

1. Формирование таблиц аэродинамических коэффициентов. На основании работ [2, 4] формируются таблицы $C_L(\alpha, V)$, $C_D(\alpha, V)$ для выбранной геометрии паруса, например, треугольный парус с заданной глубиной или дуговой парус с определённой толщиной [2, 3, 5].

2. Расчёт сил на лопасти. В имитационной модели для каждой лопасти в каждый момент времени определяется локальный угол атаки α и локальная скорость обтекания $V_{\text{лок}}$, после чего по таблицам находят силы:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho V_{\text{лок}}^2 S C_L, F_D = \frac{1}{2} \rho V_{\text{лок}}^2 S C_D.$$

Проекция этих сил на направление вращения даёт мгновенный крутящий момент, суммируемый по лопастям.

3. Моделирование вращения ротора. Дифференциальное уравнение вращательного движения ротора:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{аэродин}}(\omega, V, \theta) - M_{\text{нагрузки}}(\omega),$$

где J – момент инерции, ω – угловая скорость, θ – азимут лопасти. Это уравнение может интегрироваться численно в среде имитационного моделирования (AnyLogic, Modelica, MATLAB/Simulink и др.).

4. Модель генератора и электрической части. Мощность ротора $P_{\text{рот}} = M_{\text{аэродин}} \omega$ через КПД трансмиссии и генератора преобразуется в электрическую мощность на выходе. В имитационной модели учитываются ограничения по току, напряжению, режимы MPPT и другие [8].

5. Сценарная имитация во времени. На вход модели подаются временные ряды ветровой скорости и направления (реальные измерения или синтетические сценарии). Модель рассчитывает $\omega(t)$, $P(t)$, состояние накопителя и удовлетворённость нагрузки.

Парусные лопасти обладают сложной аэродинамикой, важным этапом является верификация. На уровне ротора – с использованием либо собственных экспериментальных данных, либо обобщённых результатов для вертикально-осевых турбин: эталонные исследования [7] позволяют сравнивать воспроизводимость крутящего момента и коэффициента мощности. На уровне аэродинамики – сопоставление результатов редуцированной модели с исходными экспериментальными данными (CFD) для выбранной геометрии [2, 3]. Обзор [6] подчёркивает, что корректный выбор сетки, модели турбулентности и временного шага в CFD-расчётах критичен для адекватного воспроизведения нестационарной аэродинамики вертикально-осевых турбин; эти же рекомендации следует учитывать и при подготовке исходных данных для имитационной модели парусных лопастей.

Было проведено годовое моделирование с шагом 1 час для двух конфигураций лопастей (парусные и классические) в идентичных условиях. В качестве входных данных использовался синтезированный временной ряд скорости ветра, отражающий типичное для равнинной местности [9] распределение Вейбулла (коэффициент формы $k=2.0$, средняя скорость 4.5 м/с).

Таблица 1. Результаты сравнительного моделирования в AnyLogic

Показатель	Парусные лопасти	Классические лопасти
Годовая выработка, кВт ч/год	315.8	261.5
Коэффициент использования установленной мощности (КИУМ)	12.0%	9.9%
Время работы при скорости ветра менее 4 м/с, % от общего	68%	42%
Максимальный коэффициент мощности C_p	0.25	0.33
Количество циклов «остановки-запуска»	124	287

Результаты, полученные при имитационном моделировании, наглядно демонстрирует ключевое преимущество парусной конфигурации: способность эффективно использовать низкоскоростной ветровой потенциал. Несмотря на более низкий пиковый C_p годовая выработка установки с парусными лопастями оказалась на 20.7 % выше за счет значительно большего времени генерации в условиях слабого ветра.

Анализ на уровне конструкции лопасти показывает, что треугольные парусные лопасти сохраняют высокие значения приведённой силы сопротивления и подъёмной силы в диапазоне малых скоростей ветра, что делает их привлекательными для низкоскоростных условий [2]. В свою очередь, работа [5], показывает, что вариация геометрии (толщины дугового паруса, глубины паруса) позволяет оптимизировать сочетание «парусного» режима (максимизация силы сопротивления) и «крыльевого» компонента, что важно для получения приемлемого коэффициента мощности ротора. CFD-исследования вертикально-осевых турбин, включая [8], демонстрируют, что за счёт многолопастных схем, оптимизации формы и применения сложной геометрии возможно существенное повышение коэффициента мощности в маломощном диапазоне. Рассмотрения этих локальных аэродинамических преимуществ в единой имитационной модели позволяет оценить:

- годовую выработку электроэнергии при известном распределении ветра;

- коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) с учётом простоев и режимов ограничения мощности;
- полнота использования низкоскоростного ветра – доля времени, когда установка стартует и несёт нагрузку при $V < 5$ м/с;
- надёжность – поведение при порывистом ветре, частота выходов за допустимые механические и электрические режимы.

По сравнению с классическими малыми горизонтально-осевыми турбинами, парусные установки потенциально выигрывают, в частности в пусковых характеристиках (ранний старт за счёт высокой силы сопротивления), в высокой адаптивности к порывам (гибкая поверхность частично сбрасывает нагрузку); в безопасности и шуме за счёт относительно низких периферийных скоростей [1, 6]. Однако имитационное моделирование зачастую выявляет и ограничения, это увеличенные механические нагрузки на систему натяжения паруса, непредсказуемость при обледенении или намокании полотна, снижение коэффициента мощности по сравнению с оптимизированными профилированными лопастями.

Стоит отметить, что наибольший потенциал парусные ветроустановки имеют в следующих областях:

1. Автономные потребители малой мощности: частные дома и малые объекты в районах со слабым и неравномерным ветром, автономные метеостанции, телекоммуникационное или индикационное оборудование.

2. Транспорт и морская инфраструктура: судовые системы совмещённого использования ветра для движения и генерации [5], прибрежные и портовые объекты, где монтаж классических высоких мачт затруднён.

3. Урбанизированная среда: вертикально-осевые и парусные конструкции могут интегрироваться в здания и инфраструктуру с высокими требованиями к шуму, что подтверждается исследованиями [6].

Ветроустановки с парусными лопастями представляют собой перспективное направление малой ветроэнергетики для регионов с низкими и переменными скоростями ветра. Наличие значимого массива аэродинамических исследований – от экспериментальных работ по обтеканию парусных лопастей до современных CFD-расчётов вертикально-осевых турбин – создаёт основу для построения достоверных имитационных моделей работы таких установок [2, 3, 8]. В статье предложен методический подход, включающий использование результирующих аэродинамических коэффициентов парусных лопастей в качестве входных данных для системной имитационной модели. Показаны подходы к моделированию динамики ротора и генератора с учётом реальных сценариев ветровой нагрузки, а также оценки ключевых показателей эффективности (годовая выработка, КИУМ, полнота использования низкоскоростного ветра).

Направления дальнейших исследований подразумевает разработку специальных параметрических моделей геометрии парусных лопастей и автоматизированный подбор формы, в том числе с использованием методов генеративного дизайна. Также требуется более точная верификация моделей на основе натурных испытаний прототипов и полунатурных стендов. В качестве

перспектив можно отметить потенциал интеграции имитационных моделей парусных ветроустановок в более широкие цифровые двойники энергообъектов и энергорайонов. Таким образом, имитационные модели выступают ключевым инструментом, позволяющим переносить сложную аэродинамику парусных лопастей на уровень системной оценки эффективности ветроустановок, снижая инженерные риски и повышая обоснованность решений при их проектировании и внедрении.

Список литературы:

1. Позняк, Б. А. Обзор современных ветровых установок / Б. А. Позняк; науч. рук. Е. Л. Юршо // Актуальные проблемы энергетики: материалы 72-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – Минск: БНТУ, 2016. – С. 227-230.
2. Kusaiynov K., Tanasheva N. K., Min'kov L. L., Nusupbekov B. R., Stepanova Yu. O., Rozhkova A. V. Numerical simulation of a flow past a triangular sail-type blade of a wind generator using the ANSYS FLUENT software package // Technical Physics. - 2016. - Vol. 61, № 2. – P. 299-301.
3. Kusaiynov K., Kambarova Zh. T., Tanasheva N. K., Shaimerdenova K. M., Alibekova A. R. Flow past the sail blade of a wind turbine // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Vol. 88, № 2. – P. 497-503.
4. Tleubergenova A. Zh., Tanasheva N. K., Shaimerdenova K. M., Kassymov S. S., Bakhtybekova A. R., Shuyushbayeva N. N. et al. Mathematical modeling of the aerodynamic coefficients of a sail blade // Advances in Aerodynamics. – 2023. – Vol. 5, № 1. – Art. 14.
5. Zhang H., Hu Y., He J. Wind tunnel experiment of multi-mode arc sail device // Polish Maritime Research. – 2021. – Vol. 28, № 4. – P. 20-29.
6. Li Y., Yang S., Feng F., Tagawa K. A review on numerical simulation based on CFD technology of aerodynamic characteristics of straight-bladed vertical axis wind turbines // Energy Reports. – 2023.
7. Rolland S., Newton W., Croft T., Gethin D., Cross M., Williams A. Benchmark experiments for simulations of a vertical axis wind turbine // Applied Energy. – 2013. – Vol. 111. – P. 1183-1194.
8. Bang C. S., Rana Z. A., Prince S.A. CFD analysis on novel vertical axis wind turbine (VAWT) // Machines. – 2024. – Vol. 12, № 11. – Art. 800.
9. Shi H., Dong Z., Xiao N., Huang Q. Wind speed distributions used in wind energy assessment: a review // Frontiers in Energy Research. 2021. Vol. 9. - URL: <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/ful>.

© Артемов А. И., Котов К. М., 2025

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РЕАКТОРОВ КЛТ-40 ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

студент **Якунькин Максим Игоревич**,
науч. руководитель: ассистент **Базин Дмитрий Александрович**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В статье проведён анализ перспектив развития реакторов КЛТ-40, подчеркивающий их роль в обеспечении устойчивого энергетического снабжения в удалённых и труднодоступных регионах. Рассматриваются технические характеристики, преимущества использования этих реакторов в сравнении с другими установками и их потенциал для применения в децентрализованной энергетике.

Ключевые слова: атомная энергетика, реактор, плавучая АЭС, децентрализованная энергетика.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF KLT-40 REACTORS FOR DECENTRALIZED ENERGY

Student **Maxim Igorevich Yakunkin**,
Academic Advisor: Assistant Professor **Dmitry Aleksandrovich Bazin**,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. This article analyzes the development prospects of KLT-40 reactors, highlighting their role in ensuring sustainable energy supplies in remote and hard-to-reach regions. It examines the technical characteristics, advantages of using these reactors compared to other units, and their potential for use in decentralized energy systems.

Keywords: nuclear energy, reactor, floating nuclear power plant, decentralized energy.

Реакторная установка (РУ) КЛТ имеет историческую значимость в атомной энергетике и военном кораблестроении. Данная установка представляет собой класс интегральных водо-водяных реакторов, разработанных для применения в условиях ограниченного пространства.

Ключевым моментом для создания малогабаритных реакторов стала государственная задача по разработке судна для круглогодичной навигации и транспортировки грузов по Северному морскому пути. Цель заключалась в том, чтобы судно должно было самостоятельно преодолевать лед метровой толщины, при этом не теряя скорости. В 1988 году на воду был спущен атомный лихтеровоз с РУ КЛТ-40 проекта 10081 АЛВ – «Севморпуть» [1].

Схема работы КЛТ-40 заключалась в двух контурах. В первом находятся основные оборудования: реактор, парогенератор и двухскоростные циркуляционные насосы. Во втором из парогенератора рабочее тело попадает в турбоустановку. Принцип работы достаточно схож с другими водо-водяными РУ под давлением, однако в отличие от полноразмерных вариантов в КЛТ-40 в качестве топлива используется высокообогащенный диоксид урана с обогащением урана-235 до 40 % [2].

Согласно проекту 10580, реакторы КЛТ-40 применялись для атомных ледоколов с номинальной мощностью 36 МВт; в 1989 году он был установлен на атомном ледоколе «Таймыр», а в 1990 году – на «Вайгач». В дальнейшем реактор был модернизирован и получил название КЛТ-40М, в котором значительно увеличили мощность, срок службы и эффективность работы. Ключевым улучшением стало значительное увеличение тепловой мощности до 170 МВт, что позволило повысить как энергоподачу, так и продолжительность кампании активной зоны без перегрузки топлива. Помимо этого, в конструкцию были заложены усовершенствованные системы пассивной безопасности, соответствующие самым современным требованиям реакторов третьего поколения [3].

К основным пассивным системам безопасности реакторов типа КЛТ-40М можно отнести:

1. Система аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ) на основе гидроемкостей.
2. Штатная пассивная система аварийного расхолаживания (САР), которая включается автоматически при снижении давления пара за парогенераторами [4].
3. Система пассивного заполнения и байпасирования первого контура, которая включается автоматически при потере теплоносителя или повреждении основного оборудования.

В дальнейшем реактор типа КЛТ вновь модернизировали, целью которой являлось создание РУ для энергоснабжения удалённых и труднодоступных регионов, островов, а также для обеспечения электроэнергией и теплом промышленных объектов в Арктике. КЛТ-40С – маломодульная морская ядерная энергетическая установка тепловой мощностью 150 МВт и электрической мощностью 35 МВт. Главной особенностью реактора является малогабаритная конструкция, что позволяет транспортировать реактор в собранном виде и быстро вводить его в эксплуатацию. При этом реактор может эксплуатироваться без выгрузки топлива около 12 лет за счёт снижения показателя обогащения топлива до 20 %. Срок службы составляет не менее 40 лет [5].

К доработанным системам безопасности можно отнести:

1. Электромеханические системы аварийной остановки реактора в любых режимах, в том числе при проектных и запроектных авариях.
2. Группа исполнительных механизмов аварийной защиты, предназначенных для мгновенного глушения реактора в аварийных ситуациях.

3. Группа исполнительных механизмов, компенсирующих избыточную реактивность на всех жизненных циклах установки.

4. Системы естественной циркуляции воды в реакторе и контурах охлаждения.

На таблице 1 представлены технические отличия в модификациях реактора КЛТ-40.

Таблица 1. Сравнение базовых характеристик модификаций реактора КЛТ-40

Технические характеристики	КЛТ-40	КЛТ-40М	КЛТ-40С
Обогащение топлива	До 40 %	До 40 %	До 20 %
Тепловая номинальная мощность, МВт	135	170	150
Электрическая мощность, МВт	35	35	35
Срок службы	30–40 лет	30–40 лет	40 лет
Ресурс активной зоны (кампания)	3–4 года	4–5 лет	До 10–12 лет

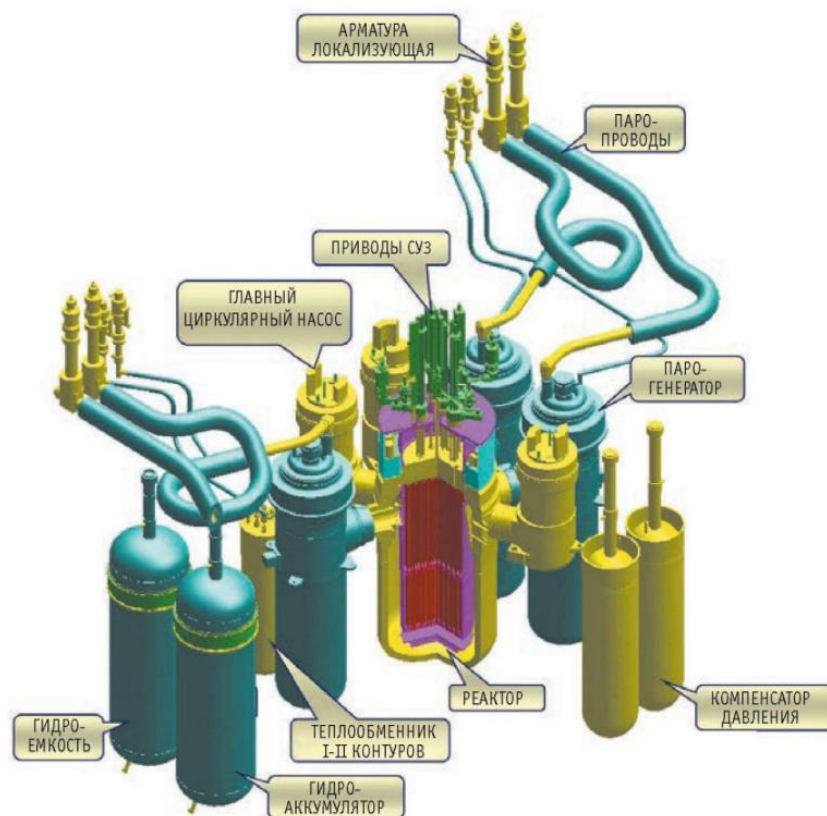


Рисунок 1. Схема реактора КЛТ-40С

Особенное внимание уделяется реактору КЛТ-40С, который был успешно установлен и запущен на первой в мире плавучей атомной электростанции (ПАТЭС) «Академик Ломоносов». Установка относится к двухконтурным

типам водо-водяных реакторов и соединена с остальным оборудованием системой патрубков «труба в трубе» (рис. 1). На плавучей станции также предусмотрены системы резервного оборудования, в том числе для РУ КЛТ, который был продублирован.

Станция спроектирована таким образом, что позволяет обеспечивать постоянную электрическую и тепловую энергию, находясь рядом с распределительным пунктом. То есть ПАТЭС может осуществлять генерацию на берегу возле любого объекта или города, у которого недостаточно развита инфраструктура. Главным условием для осуществления энергоснабжения является наличие свободных путей по морским маршрутам.

В судостроении применяются и другие реакторы малой мощности. На атомных ледоколах проекта 22220 устанавливались реакторы РИТМ-200. Принципиальное отличие от типа КЛТ-40 заключается в том, что основные оборудование реакторной установки размещены внутри основного корпуса, что обеспечивает компактность, значительное снижение массогабаритных характеристик и упрощение эксплуатации (рис. 2).

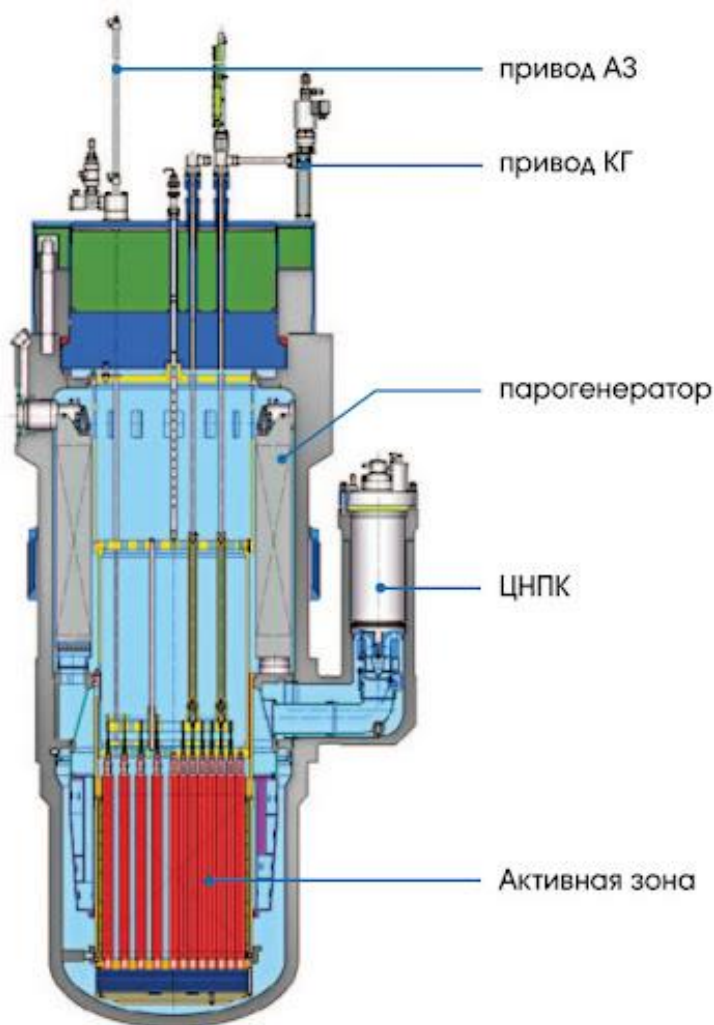


Рисунок 2. Схема реактора РИТМ-200

Технические характеристики между двумя типами реакторов также отличаются. У РИТМ-200 тепловая и электрическая мощность выше, но при этом ресурс активной зоны меньше (таблица 2).

Таблица 2. Сравнение базовых характеристик модификаций реактора КЛТ-40

Технические характеристики	КЛТ-40С	РИТМ-200
Обогащение топлива	До 20 %	До 20 %
Тепловая номинальная мощность, МВт	150	175
Электрическая мощность, МВт	35	55
Срок службы	40 лет	40 лет
Ресурс активной зоны (кампания)	До 10–12 лет	7 лет

Реактор КЛТ-40С доказал свою энергетическую эффективность и удобство в эксплуатации, что даёт возможность его применения не только в судостроении. Учитывая его относительно низкую электрическую и тепловую мощность, а также высокий ресурс активной зоны, можно считать, что такой тип реактора малой мощности можно применять и для обеспечения производства энергии в местах, недостижимых морскими путями, имеющих слабую инфраструктуру и не входящих в единые энергетические системы России [6]. Однако в сравнении с более компактными и мощными реакторами РИТМ возникает вопрос о дальнейшей модернизации таких типов, которая может упростить эксплуатацию и при этом не сделать его менее безопасным.

Список литературы:

1. История атомных реакторов / КЛТ-40 // Росатом Истории [сайт]. – URL: <https://www.biblioatom.ru/core-systems/nuclear-reactors/klt-40/> (дата обращения: 24.11.2025). – Текст: электронный.
2. Бочкарев, В. М. Состояние и перспективы атомной энергетики в России / В. М. Бочкарев, К. Е. Луговой // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2022. – Т. 2. – С. 248–250. – Текст: непосредственный.
3. Шульга, Р. Н. Использование судовой энергетики для жизнеобеспечения арктических объектов / Р. Н. Шульга, Т. С. Смирнова // Российская Арктика. – 2020. – № 8. – С. 23-36.
4. Аполлова, А. В. Развитие систем пассивного отвода тепла / А. В. Аполлова, А. В. Хахлунов // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2021. – № S1. – URL: cyberleninka.ru (дата обращения: 24.11.2025). – Текст: электронный.

5. Реакторные установки КЛТ–40С для атомных станций малой мощности // Акционерное общество «Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения имени И. И. Африкантова» URL: <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/68d/68d2a9ecbfe31ad79ea5efa0e45526b3.pdf> (дата обращения: 24.11.2025).
6. Худяков, И. С. Обзор современных тенденций и основных конструктивных решений для реакторных установок малой мощности / И. С. Худяков, Г. Н. Власичев // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2021. – № 2 (133). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-sovremennyh-tendentsiy-i-osnovnyh-konstruktivnyh-resheniy-dlya-reaktornyh-ustanovok-maloy-moschnosti> (дата обращения: 27.11.2025). – Текст: электронный.

© Якунькин М. И., 2025

ИНТЕГРАЦИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДУЛЕЙ ОЦЕНКИ ДЕЙСТВИЙ ОПЕРАТОРОВ, ОБУЧАЕМЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MANIFOLD MUON ОПТИМИЗАЦИИ

аспирант, ассистент **Иванов Олег Олегович**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологий и энергетики,
Санкт-Петербург, Российский Федерация

Аннотация. В работе предложена методология интеграции нейросетевых модулей для оценки действий операторов тренажерных систем с применением принципов оптимизации на многообразии (manifold-based), конкретно метода manifold Muon. Метод обеспечивает обучение параметров нейросетей с явным учётом геометрических ограничений на многообразии Штифеля, что приводит к повышению устойчивости и надёжности обучения. Представлены математические основы, алгоритмическая реализация и листинг.

Ключевые слова: многообразие Штифеля, оптимизация на многообразиях, manifold Muon, нейросетевые модели, оценка действий операторов, спектральное ограничение, касательное пространство.

INTEGRATION OF NEURAL NETWORK MODULES FOR ASSESSING OPERATOR ACTIONS TRAINED USING MANIFOLD MUON OPTIMIZATION

Postgraduate Student, Assistant **Ivanov Oleg Olegovich**,
Saint Petersburg State Technical University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Power Engineering,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. This paper proposes a methodology for integrating neural network modules for assessing the actions of simulator operators using manifold-based optimization principles, specifically the Muon manifold method. This method enables training of neural network parameters with explicit consideration of geometric constraints on the Stiefel manifold, leading to increased stability and reliability of training. The mathematical foundations, algorithmic implementation, and listing.

Keywords: Stiefel manifold, optimization on manifolds, manifold Muon, neural network models, operator performance evaluation, spectral constraint, tangent space.

Введение

В современных реалиях оценка действий операторов в тренажерных системах (энергетические комплексы, атомные электростанции, система

управления насосных установок) требует построения адаптивных моделей, способных классифицировать и прогнозировать операторские действия в реальном времени. Традиционные подходы к обучению нейросетей не учитывают геометрические ограничения на пространство параметров, что может приводить к деградации весов, неустойчивости градиентного спуска и переобучению [2, 3].

Риманова геометрия и оптимизация на многообразиях открывают новые возможности для контролируемого обучения с явным учётом структурных ограничений на весовые матрицы. Многообразие Штифеля $V_{n,k}$ – множество всех ортонормированных матриц $W \in \mathbb{R}^{n \times k}$, удовлетворяющих $W^T W = I_k$, что предоставляет естественный геометрический каркас для параметров нейросетей.

Метод manifold Muon, предложенный в работе, объединяет идеи проекции на касательное пространство многообразия, ограничение по спектральной норме и эффективную ретракцию, позволяя достичь устойчивого обучения с гарантированным сохранением геометрической структуры параметров.

Целью данной работы является разработка интегрированного подхода к обучению нейросетевых модулей оценки операторских действий с применением метода manifold Muon, а также демонстрация преимуществ перед классическими оптимизаторами в контексте тренажеров.

Топологические аспекты

Точкой этого многообразия является упорядоченный ортонормированный набор из k векторов $x = (e_1, \dots, e_k)$ в n -мерном евклидовом пространстве. Ортогональная матрица $A \in O(n)$ переводит точку x в точку $Ax = (Ae_1, \dots, Ae_k)$, причём векторы $(Ae_1, \dots, Ae_k)$ также ортонормированы. Это действие транзитивно.

Многообразие Штифеля $V_{n,k}$ можно задать как неособую поверхность в евклидовом пространстве $\mathbb{R}^{nk}$. Именно, пусть относительно некоторого ортонормированного базиса в $\mathbb{R}^n$ векторы $e_1, \dots, e_k$ имеют координаты

$$e_i = (x_{i1}, \dots, x_{in}), i = 1, \dots, k.$$

Величины $x_{ij}, i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, n$ суть координаты точки в nk -мерном евклидовом пространстве $\mathbb{R}^{nk}$. Эти координаты связаны системой из $k(k+1)/2$ уравнений

$$\langle e_i, e_j \rangle = \delta_{ij} \Leftrightarrow \sum_{s=1}^n x_{is} x_{js} = \delta_{ij}, i, j = 1, \dots, k, i \leq j.$$

Лемма 1. Многообразие Штифеля $V_{n,k}$ есть неособая поверхность размерности $nk - \frac{k(k+1)}{2}$ в пространстве $\mathbb{R}^{nk}$.

Доказательство. Ввиду наличия группы, транзитивно действующей на $V_{n,k}$, достаточно доказать неособость в одной точке. Проверим неособость в окрестности точки, где $x_{ij} = \delta_{ij}, i=1, \dots, k; j=1, \dots, n$. Для этого докажем, что касательное пространство к поверхности $V_{n,k}$ в этой точке имеет размерность $nk - \frac{k(k+1)}{2}$.

Ранг матрицы Якоби системы (1) равен $\frac{k(k+1)}{2}$. Пусть $x_{ij} = x_{ij}(t)$ – кривая на поверхности $V_{n,k}$, при $t=0$ проходящая через точку x_0 :

$$\sum_{s=1}^n x_{is}(t) x_{js}(t) = \delta_{ij}, i, j = 1, \dots, k.$$

Дифференцируя по t при $t=0$, получим

$$\sum_{s=1}^n \xi_{is}(t) x_{sj}^0 + \xi_{sj}(t) x_{ij}^0 = 0, i, j = 1, \dots, k,$$

где $x_{ij}^0 = x_{ij}(0) = \delta_{ij}$.

Вектор скорости $\xi_{ij} = \frac{dx_{ij}(t)}{dt}|_{t=0}$ этой кривой в точке x_0 удовлетворяет соотношению

$$0 = \frac{d}{dt} \left(\sum_{s=1}^n x_{is}(t) x_{js}(t) \right) |_{t=0} = \xi_{ij} + \xi_{ji}, i, j = 1, \dots, k.$$

Итак, касательное пространство в точке x_0 к поверхности $V_{n,k}$ состоит из векторов (ξ_{ij}) в $\mathbb{R}^{kn}$, таких, что выполняется указанное соотношение:

$$\xi_{ij} = -\xi_{ji}, i, j = 1, \dots, k.$$

Размерность этого пространства как раз и равна $nk - \frac{k(k+1)}{2}$. Лемма доказана.

Группа изотропии многообразия Штифеля

Итак, $V_{n,k}$ – гладкое многообразие. Найдём группу изотропии этого однородного пространства. Дополним репер $e_1, \dots, e_k$ до ортонормированного базиса $e_1, \dots, e_n$ во всём n -мерном евклидовом пространстве. Ортогональная матрица, не меняющая векторов $e_1, \dots, e_k$, имеет в выбранной системе координат вид

$$\begin{pmatrix} I_k & 0 \\ 0 & A \end{pmatrix}, A \in O(n-k).$$

Значит, группа изотропии есть $O(n-k)$, и $V_{n,k} = O(n) / O(n-k)$.

Многообразие Штифеля $V_{n,k}$, при $k < n$, можно рассматривать как

однородное пространство группы $SO(n)$. В этом случае

$$V_{n,k} = SO(n) / SO(n-k).$$

В частности,

$$V_{n,1} = O(n) / O(n-1) \cong S^{n-1},$$

$$V_{n,n} = SO(n) / SO(0) = SO(n).$$

Лемма 2. Пусть $1 \leq k < n$. Тогда:

$$\pi_i(V(n,k)) = 0 \text{ при } i < n-k;$$

$$\pi_{n-k}(V(n,k)) = \begin{cases} Z, & \text{если } k=1 \text{ или } n-k \text{ чётно,} \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Доказательство. Случай $n=2$ тривиален ($V(2,1) = S^1$). Предположим, что для $V(n-1,k)$ лемма доказана и рассмотрим расслоение

$$V(n,k) \xrightarrow{V(n-1,k-1)} S^{n-1}$$

(проекция ставит в соответствие реперу его первый вектор). Нам нужен фрагмент его гомотопической последовательности

$$\pi_{i+1}(S^{n-1}) \rightarrow \pi_i(V(n-1,k-1)) \rightarrow \pi_i(V(n,k)) \rightarrow \pi_i(S^{n-1}).$$

Если $i < n-2$, то крайние члены – нули, средняя стрелка – изоморфизм, и мы получаем нужное для $V(n,k)$ при $k > 2$.

Случай $V(n,1)$ очевиден ($V(n,1) = S^{n-1}$), остаётся случай $V(n,2)$. В этом случае наш фрагмент с $i = n-k$ имеет вид:

$$\begin{aligned} \pi_{n-1}(S^{n-1}) &\rightarrow \pi_{n-2}(S^{n-2}) \rightarrow \pi_{n-2}(V(n,2)) \rightarrow \pi_{n-2}(S^{n-1}), \\ Z &\rightarrow Z \rightarrow \pi_{n-2}(V(n,2)) \rightarrow 0. \end{aligned}$$

Наше утверждение в точности означает, что первая стрелка $Z \rightarrow Z$ тривиальна при чётном n и является умножением на 2 при нечётном n . Докажем этот факт. Прежде всего, само расслоение есть $T_{(1)}(S^{n-1}) \rightarrow S^{n-1}$, где $T_{(1)}$ обозначает пространство единичных касательных векторов. Нужно поднять в пространство расслоения сфероид, в нашем случае тождественный (образующую группу $\pi_{n-1}(S^{n-1})$), разорвав его в одной точке, и взять получающееся в этой точке отображение $S^{n-2} \rightarrow \text{слой} = S^{n-2}$. Другими словами, на S^{n-1} нужно построить векторное поле с одной особой точкой; векторы этого поля в точках маленькой сферы, окружающей особую точку, и зададут наше отображение $S^{n-2} \rightarrow S^{n-2}$.

На S^{n-1} легко построить векторное поле с двумя особенностями: взять стрелки, указывающие на север, если охватить особые точки (полюса) общей сферой. Соответствующее отображение $S^{n-2} \rightarrow S^{n-2}$ есть сумма двух

сфероидов: тождественного и антиподального. Степень такого отображения равна $1 + (-1)^{n-1}$, что нам и требуется.

Касательное пространство и его геометрическая интерпретация

Для произвольного матричного градиента $G \in \mathbb{R}^{n \times k}$ его проекция на касательное пространство в точке W определяется как:

$$\text{Proj}_{T_W}(G) = G - W \frac{W^T G + G^T W}{2}.$$

Утверждение 1. Матрица $\text{Proj}_{T_W}(G)$ принадлежит касательному пространству $T_W V_{n,k}$.

Доказательство. Проверим условие Леммы 1:

$$\text{Proj}_{T_W}(G)^T W + W^T \text{Proj}_{T_W}(G) = \left(G - W \frac{W^T G + G^T W}{2} \right)^T W + W^T \left(G - W \frac{W^T G + G^T W}{2} \right).$$

После раскрытия скобок и использования симметрии слагаемого $\frac{W^T G + G^T W}{2}$, получим нулевой результат.

Касательное пространство $T_W V_{n,k}$ описывает все допустимые направления движения по многообразию в окрестности точки W . Геометрически, это означает, что обновление параметров $W \rightarrow W + \alpha A$ при $A \in T_W V_{n,k}$ и малых $\alpha > 0$ остаётся близким к многообразию. В контексте обучения нейросетей это гарантирует контролируемое изменение весов без деградации их структурной целостности.

Метод Manifold Muon. Постановка задачи оптимизации на многообразии

Задача состоит в минимизации дифференцируемой функции потерь $L(W)$ при ограничении $W \in V_{n,k}$:

$$\min_{W \in V_{n,k}} L(W).$$

Стандартный подход градиентного спуска в евклидовом пространстве:

$$W_{t+1} = W_t - \eta \nabla L(W_t),$$

не гарантирует нахождение W_{t+1} на многообразии. Метод manifold Muon решает эту проблему посредством двухэтапного процесса: (1) проекции градиента на касательное пространство, (2) ретракции обновлённого параметра на многообразие.

Ограничение по спектральной норме

Спектральная норма матрицы A определяется как максимальное сингулярное число:

$$\|A\|_2 = \sigma_{\max}(A),$$

где $\sigma_{\max}(A)$ – наибольшее сингулярное число матрицы A .

В методе manifold Muon величина шага обновления ограничивается:

$$\|A\|_2 \leq \eta,$$

где $\eta > 0$ – гиперпараметр, контролирующий величину изменения весов. Это ограничение предотвращает резкие скачки параметров и улучшает стабильность обучения [6, 7].

Решение двойственной задачи

Для нахождения оптимального направления обновления A^* , удовлетворяющего ограничению спектральной нормы, решается двойственная задача:

$$A^* = \arg \min_{A: \|A\|_2 \leq \eta} \langle G_{\text{proj}}, A \rangle,$$

где $G_{\text{proj}} = \text{Proj}_{T_W}(G)$ – проецированный градиент.

Оптимальное решение имеет вид:

$$A^* = -\eta \frac{G_{\text{proj}}}{\|G_{\text{proj}}\|_2} \text{ при } \|G_{\text{proj}}\|_2 > \eta,$$

$$A^* = -G_{\text{proj}} \text{ при } \|G_{\text{proj}}\|_2 \leq \eta.$$

Ретракция на многообразие через QR-разложение

После применения шага обновления:

$$W_{\text{temp}} = W + \alpha A^*,$$

требуется вернуть W_{temp} на многообразие. Эффективный и численно устойчивый способ – использование QR-разложения:

$$W_{\text{new}} = Q, \text{ где } [Q, R] = \text{qr}(W_{\text{temp}}).$$

Ортогональная матрица Q гарантированно принадлежит многообразию Штифеля и является близкой к W_{temp} в смысле фробениусовой нормы.

Архитектура нейросетевого модуля

Нейросетевой модуль для оценки операторских действий состоит из следующих компонентов:

- входной слой: векторы параметров состояния системы (давление, температура, расход, команды оператора);
- скрытые слои: нелинейные преобразования с весовыми матрицами на многообразии Штифеля;
- выходной слой: векторы оценок качества операторских действий (оценка опасности, рекомендации).

Ключевое отличие от стандартных нейросетей – применение ограничений на ортонормированность весов в критических слоях.

Функция потерь с учётом особенностей операторских действий

Для оценки операторских действий используется комбинированная функция потерь [1, 2]:

$$L(W) = L_{\text{основная}}(W) + \lambda_1 L_{\text{регуляризация}}(W) + \lambda_2 L_{\text{консистентность}}(W),$$

где:

$$L_{\text{основная}} = \mathbb{E}[\|y - f(W, x)\|^2] - \text{квадратичная ошибка прогноза},$$

$L_{\text{регуляризация}} = \sum_i |W_i| * -$ норма для контроля сложности (где $\|\cdot\|_*$ – норма, сумма сингулярных чисел),

$L_{\text{консистентность}} = \sum_t |f(W, x_t) - f(W, x_{t-1})|^2$ – «штраф» за резкие изменения оценок,

$\lambda_1, \lambda_2 > 0$ – коэффициенты регуляризации.

Такая комбинация обеспечивает не только точность предсказания, но и устойчивость оценок операторских действий при вариациях входных данных.

Адаптация метода Muon для многослойных сетей

Для применения метода manifold Muon к многослойным нейросетям используется послойный подход:

Для каждого слоя i вычисляется его собственный градиент G_i ;

Проекция и обновление применяются независимо к каждому слою;

Параметры разных слоёв оптимизируются на одном общем временном графике с координацией через главный оптимизатор.

Это обеспечивает гибкость и сохраняет преимущества метода на уровне отдельных весовых матриц.

Листинг 1. Пример функции в Matlab

```
function [W_opt, losses, ortho_err] = train_operator_evaluator(X_train, Y_train, X_val, Y_val, varargin)
```

```
% Обучение модели оценки операторских действий методом manifold Muon
```

```
% Вход: X_train – обучающие данные (m x n)
```

```
% Y_train – целевые значения (m x p)
```

```
% X_val, Y_val – валидационные данные
```

```
% Выход: W_opt – оптимальные веса на многообразии Штифеля
```

```
% Параметры по умолчанию
```

```
p = inputParser;
```

```
addParameter(p, 'eta', 0.3, @isnumeric);
```

```
addParameter(p, 'alpha', 0.05, @isnumeric);
```

```
addParameter(p, 'max_iter', 100, @isnumeric);
```

```
addParameter(p, 'k', 8, @isnumeric);
```

```
parse(p, varargin{:});
```

```
eta = p.Results.eta;
```

```
alpha = p.Results.alpha;
```

```
max_iter = p.Results.max_iter;
```

```
k = p.Results.k;
```

```
[m, n] = size(X_train);
```

```
% Инициализация весов на многообразии Штифеля
```

```
[W, ~] = qr(randn(n, k), 0);
```

```
losses = zeros(max_iter, 1);
```

```
ortho_err = zeros(max_iter, 1);
```

```
for t = 1:max_iter
```

```
    % Вычисление градиента
```

```
    Y_pred = X_train * W;
```

```
    residual = Y_pred - Y_train;
```

```

G = (2/m) * (X_train' * residual);
% Проекция на касательное пространство
sym_part = (W' * G + G' * W) / 2;
G_proj = G - W * sym_part;
% Ограничение по спектральной норме
norm_G = norm(G_proj, 2);
if norm_G > eta
    A = -eta * G_proj / norm_G;
else
    A = -G_proj;
end
% Обновление и ретракция
W_temp = W + alpha * A;
[Q, ~] = qr(W_temp, 0);
W = Q;
% Логирование
Y_val_pred = X_val * W;
losses(t) = norm(Y_val_pred - Y_val, 'fro')^2 / size(X_val, 1);
ortho_err(t) = norm(W' * W - eye(k), 'fro');
fprintf('Iter %3d: Loss=%0.4f, OrthoErr=%0.2e\n', t, losses(t), ortho_err(t));
end
W_opt = W;
end

```

Заключение

В работе предложена методология интеграции нейросетевых модулей оценки операторских действий с применением метода manifold Muon для оптимизации на многообразии Штифеля. Результаты работы могут быть использованы для разработки систем обучения принятия решений в тренажерных комплексах.

Список литературы:

1. Бешелев, А. В. Нейросетевые модели оценки действий оператора: архитектура и применение в системах критического назначения / А. В. Бешелев, А. А. Фролов // Автоматика и телемеханика. – 2023. – Т. 84, № 7. – С. 45–68.
2. Гераськин, В. В. Оптимизация параметров систем поддержки решений для операторов техногенных комплексов / В. В. Гераськин, О. В. Козлов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия: Приборостроение. – 2022. – № 5 (140). – С. 112–131.
3. Goldfarb D., Wen Z., Yin W. A curvilinear search method for p-harmonic maps on spheres // SIAM J. Imaging Sci. 2013. Vol. 6. No. 2. P. 1138–1157.
4. Agarwal N., Boumal N., Bullins B., Cartis C. First-order methods almost always avoid saddle points // Math. Program. 2020. Vol. 176. No. 1-2. P. 311–337.
5. Absil P.-A., Mahony R., Sepulchre R. Optimization algorithms on matrix manifolds. Princeton: Princeton University Press, 2008. 472 p.
6. Bernstein J., Ivgi Y., Bahri Y., Schwab D. Manifold Muon: A new method for

neural network optimization // arXiv:2509.24406. 2025.

7. Zhu X., So A.M.-C. A unified analysis of stochastic optimization methods with variance reduction and coordinate sampling // In: Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning, Stockholm, Sweden. 2018. P. 5906–5915.

8. Trefethen L.N., Bau D. Numerical linear algebra. Philadelphia: SIAM, 1997. 361 p.

9. Смольников, С. И. Датасет операторских действий в системе управления насосными установками / С. И. Смольников, М. Н. Петров, В. А. Сидоров. – Москва : ИСП РАН, 2024. – 34 с. – (Препринт / Институт системного программирования им. В. П. Иванникова РАН; № 28).

10. Kingma D.P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization // In: International Conference on Learning Representations (ICLR). San Juan, Puerto Rico, May 2-4. 2016. P. 1–15.

11. Nesterov Y. A method of solving a convex programming problem // Soviet Math. Doklady. 1983. Vol. 27. No. 2. P. 372–376.

12. Tieleman T., Hinton G. Lecture 6.5-rmsprop: Divide the gradient by a running average of its recent magnitude // COURSERA: Neural networks for machine learning. 2012. No. 4. P. 26–31.

© Иванов О. О., 2025

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ НЕПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИКИ И ФОТОНИКИ

д-р техн. наук, профессор **Буймистрюк Григорий Яковлевич**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Техническая академия Росатома,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В работе представлены передовые подходы и технические решения, разработанные для повышения надежности систем управления защитой опасных производственных объектов: комплекс средств автоматизации, построенный на базе непрограммируемой логики и волоконной оптики. Рассмотрены возможности синтеза систем противоаварийной автоматической защиты повышенной надёжности и безопасности в процессе эксплуатации объектов при отказах в электронных программируемых логических контроллерах, датчиках, линиях связи и исполнительных устройствах контура автоматизации.

Ключевые слова: объекты энергетики, противоаварийная защита, надёжность, безопасность, непрограммируемая логика, волоконная оптика.

THE PRINCIPLES OF CONSTRUCTION AUTOMATIC EMERGENCY PROTECTION SYSTEMS FOR ENERGY FACILITIES BASED ON NON-PROGRAMMABLE LOGIC AND PHOTONICS

Doctor of Technology, Professor **Buymistriuk Grigory Yakovlevich**,
St-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
The Technical Academy of Rosatom
Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper presents advanced approaches and technical solutions developed to improve the reliability of control systems for the protection of hazardous production facilities: a complex of automation tools based on non-programmable logic and fiber optics. The possibilities of synthesizing anti-emergency automatic protection systems of increased reliability and safety during the operation of facilities in case of failures in electronic programmable logic controllers, sensors, communication lines and actuators of the automation circuit are considered.

Keywords: energy facilities, emergency protection, reliability, safety, non-programmable logic, fiber optics.

Введение

По данным государственной статистики аварийность на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности составляет ежегодную трагическую аварию (с гибелью людей). Поэтому весьма актуальной является задача синтеза систем противоаварийной защиты опасных производственных объектов.

Разработанные и разрабатываемые в мире новые требования безопасности в части АСУ ТП в энергетике касаются в основном следующих вопросов:

1. Повышение надежности и отказоустойчивости систем важных для безопасности: систем противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ).
2. Уточнение концепции глубокоэшелонированной защиты с учетом допущения для систем безопасности отказа по общей причине (ООП).
3. Обеспечение высокой степени разнообразия систем безопасности для целей обнаружения и исключения опасных отказов, прежде всего ООП [1-3].

Непрограммируемая логика

Исторически модули управления на жёсткой логике строились в прошлом веке до появления микропроцессоров, а теперь они на новом витке диалектического развития технологии востребованы для применения в системах обеспечения безопасности. В современной Концепции глубокоэшелонированной защиты АСУ ТП – концепции разнообразия – радикальным способом достижения разнообразия является применение непрограммируемой логики (НПЛ).

Технические средства (ТС) должны разрабатываться с учётом требований:

- проверяемости технических решений на этапе разработки;
- глубокой диагностируемости ТС на этапе эксплуатации;
- предсказуемости поведения ТС при отказе.

Реализация ответственных функций на НПЛ позволяет:

- исключить из рассмотрения непредсказуемую надёжность ПО;
- исключить влияние на функцию защиты аспектов кибербезопасности;
- проводить расчёты надёжности с учётом ООП, что невозможно с ПО.

На модулях НПЛ реализованы (рисунок 1):

- сбор и обработка аналоговых сигналов (аналого-цифровое преобразование, масштабирование, компенсация, коррекция, разность значений насыщения, сравнение с уставкой);

- логическая обработка (И, ИЛИ, НЕ, триггер, выдержка времени) в соответствии с алгоритмами;

- мажоритарная обработка сигналов;
- внутриблочная диагностика (сторожевые таймеры);
- диагностическое опробование.

На модулях программируемой логики (ПЛК) реализованы:

- сбор сигналов по цифровым сетям и передача их в верхний блочный уровень;

- вычисление рассогласований по одноимённым аналоговым сигналам.
- Структурная схема комплексной системы автоматизации с диверсной

защитой, то есть основанной на технико-технологическом разнообразии, и с функциями опробования и контроля прохождения сигналов на базе НПЛ, то есть непрограммируемой логики (рис. 1) [3].

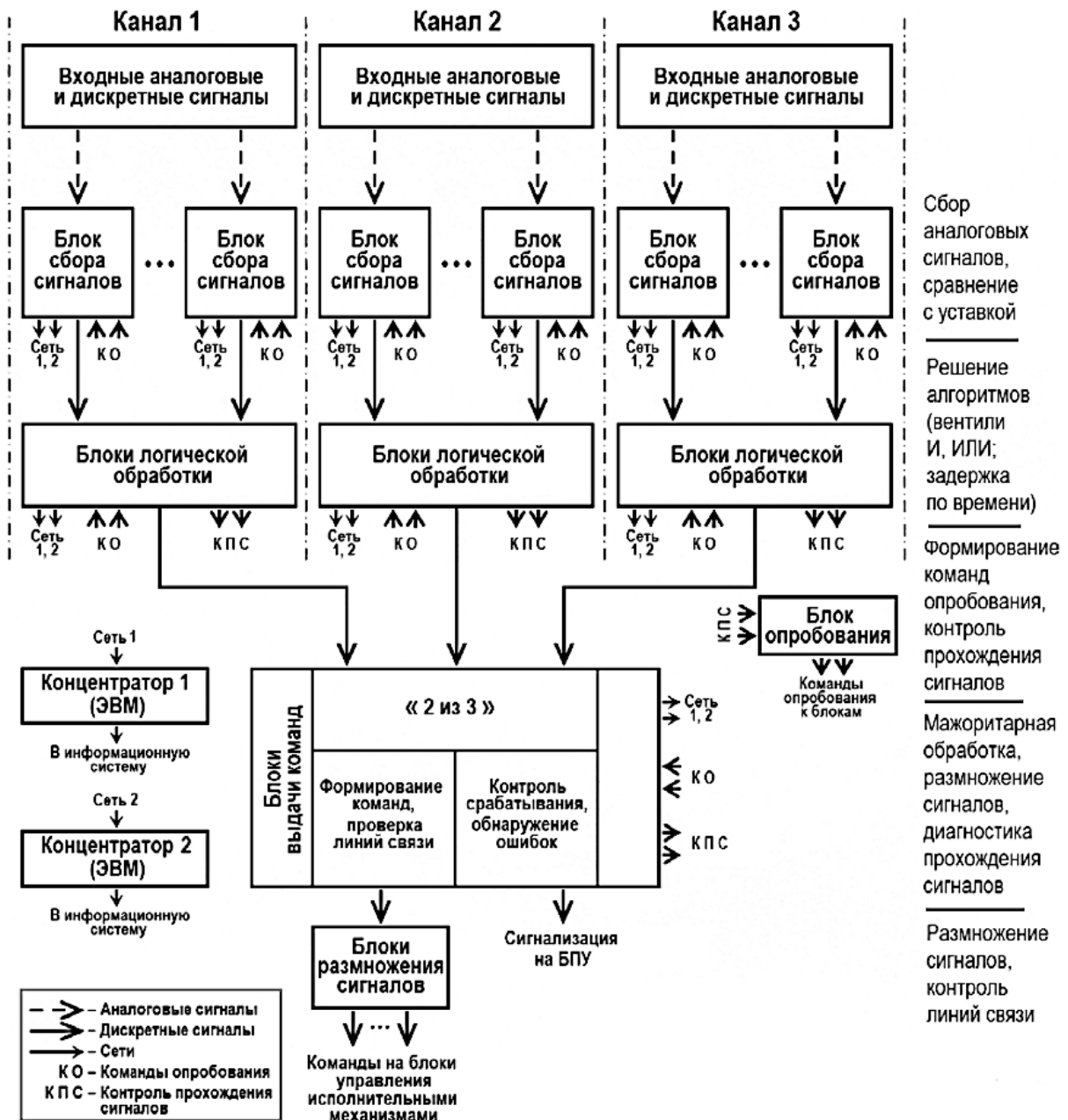


Рисунок 1. Схема комплексной системы автоматизации на базе НПЛ

Влияние программируемых средств на работу НПЛ исключено схемотехнически:

- Передача сигналов через однонаправленные буферы с защитой выходов.
- Независимые цепи электропитания модулей ПЛК и НПЛ (рис. 2).

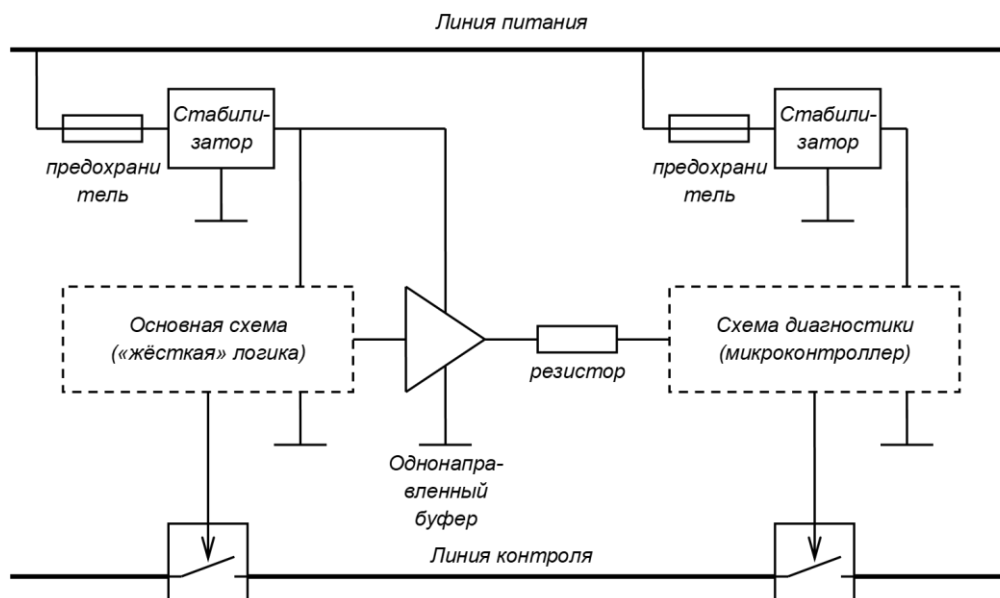


Рисунок 2. Схема разделения «жесткой» логики от программируемой

Процесс разработки и создания модулей и шкафов систем управления защитой (рис. 3) предусматривает компьютерное моделирование технологических процессов (ТП) объекта управления, проектирование алгоритма и программирование на любом языке высокого уровня (СИ, Паскаль) и обязательное кодирование на одном из пяти стандартных языков по ГОСТ Р МЭК 61131-3: функциональных блоков или структурированных текстов и др. На основании кодированного алгоритма проектируются, производятся и тестируются модули «жесткой» непрограммируемой логики.



Рисунок 3. Общий вид шкафа КСА, порядок создания и модуль НПЛ

УЖЦИ – управление жизненным циклом изделия;

УДИ – управления данными об изделии;

ЭКБ – элементно-компонентная база

Преимущества системы контроля и управления на НПЛ:

- как специализированная система (в отличие от универсальной) НПЛ не имеет аппаратной избыточности;
- НПЛ может обеспечить максимальное быстродействие, так как скорость выполнения алгоритмов обработки информации определяется в НПЛ только быстродействием логических элементов и выбранной схемой путей прохождения информации;
- НПЛ обеспечивает максимальную киберзащиту АСУ ТП.

Комплекс ТС реализован на основе технических решений и с применением элементной базы, отработанных и апробированных в технических средствах НПЛ систем ПАЗ ряда АЭС: российских (Нововоронежской, Ростовской, Калининской и Ленинградской и др.) и зарубежных – «Куданкулам» (Индия), «Руппур» (Бангладеш), «Аккую» (Турция), Аль-Дабаа (Египет) и др.

Волоконно-оптические решения

Современные аварии на сложных объектах промышленности и энергетики сопровождаются критическими и экстремальными условиями протекания: быстротой возгорания, высокими температурами, давлениями, радиацией и обесточиванием приборных систем безопасности, прежде всего первичных датчиков в зоне аварии.

Радикальным подходом к решению проблем предотвращения и управления авариями, в том числе запроектными, является применение волоконно-оптических технологий [5], [6].

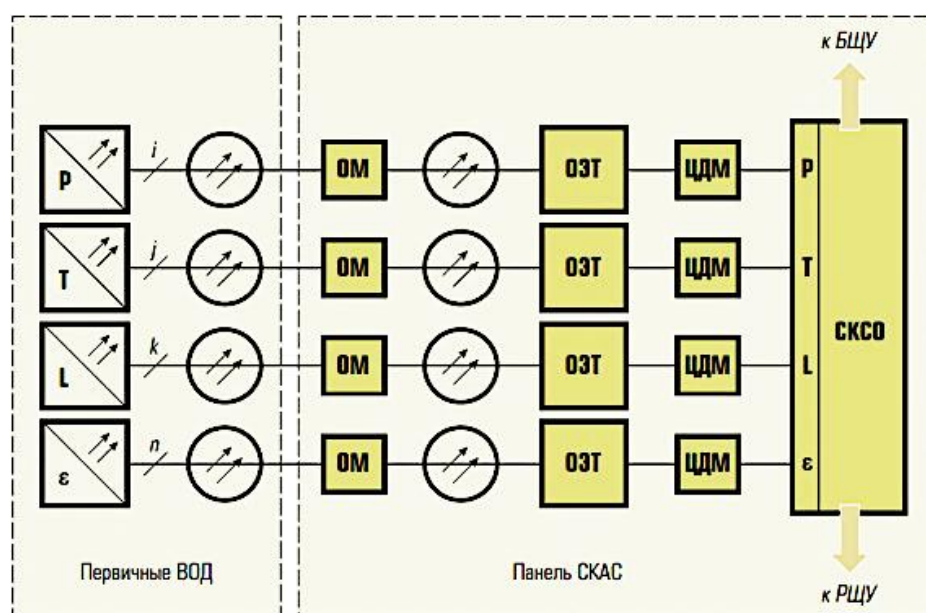


Рисунок 4. Многоканальная система контроля аварийных состояний (СКАС):

ОМ – оптические мультимплексоры; ОЭТ – оптико-электронные трансиверы;

ЦДМ – цифровые демультимплексоры; СКСО – субкомплекс сбора и

обработки; БЩУ, РЩУ – блочный и резервный щиты управления

Волоконно-оптические датчики (ВОД) обладают уникальными физическими свойствами, определяющими их применимость в экстремальных и критических условиях аварий:

- абсолютная взрыво- пожаробезопасность сенсоров;
- абсолютная устойчивость сенсоров к электромагнитным помехам;
- высокая стойкость сенсоров к химически агрессивным веществам;
- максимальное быстродействие измерений сенсорами;
- не требуется электропитания и заземления для сенсоров в зонах установки;
- долговременная метрологическая стабильность сенсоров.

Эти достоинства ВОД обусловлены тем, что в отличие от электронных, фотонные элементы электрически пассивны, ибо фотоны не имеют заряда и массы.

Многоканальная система контроля аварийных ситуаций (СКАС) строится на массиве сенсоров i, j, k, n ВОД на разные параметры P, T, L, ε ТП во многих точках контроля (рис. 4), основной состав которой показан на фотографии (рис. 5), которая пригодна для предотвращения аварий и управления ими.

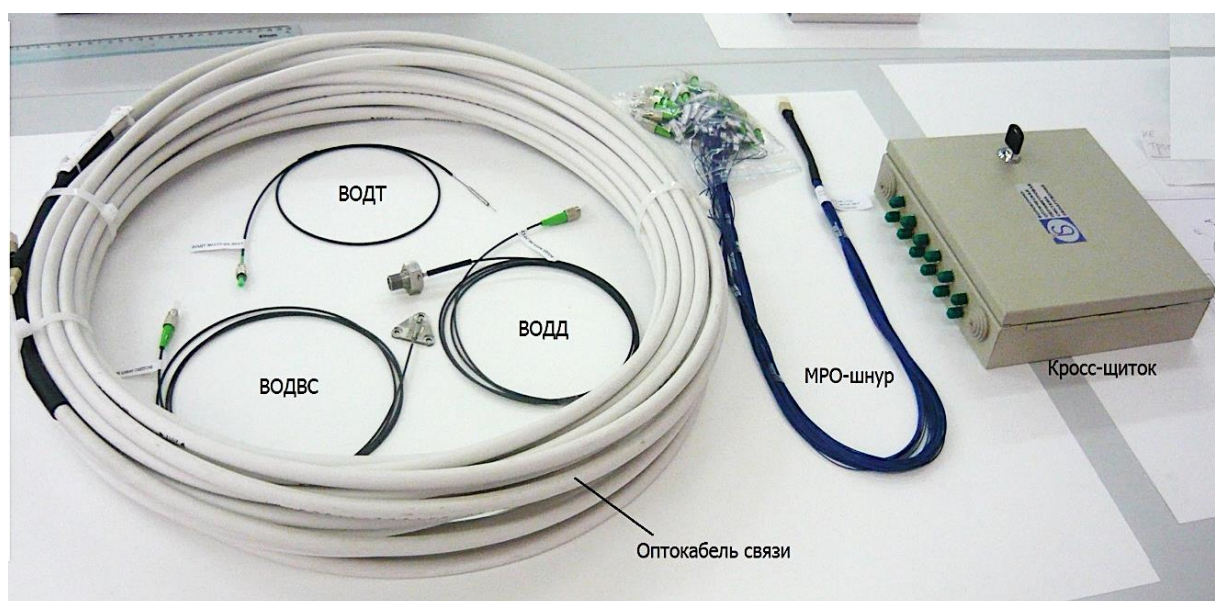


Рисунок 5. Основные компоненты состава многоканальной СКАС:
ВОДТ, ВОДД и ВОДВ – волоконно-оптические датчики температуры, давления и вибрации соответственно;
МРО – многоволоконный оптический патч-корд

Синтез систем ПАЗ

Многоканальная ПАЗ является одним из предотвращающих слоев защиты группы $\Gamma = \{\text{ОПО1}, \text{ОПО}n\}$ опасных производственных объектов, т. е. она предназначена для существенного снижения частоты и тяжести аварий, являющихся следствием инцидентов на этих объектах (рис. 6).

Качество функционирования системы ПАЗ определяется свойствами технологического процесса и должно быть таким, чтобы обеспечить так называемый *приемлемый риск*, связанный с функционированием ОПО.

Выбор величины приемлемого риска, обеспечиваемого системами ПАЗ, основывается на нормативных документах по функциональной безопасности, в первую очередь, ГОСТ Р МЭК 61508 и ГОСТ Р МЭК 61511.

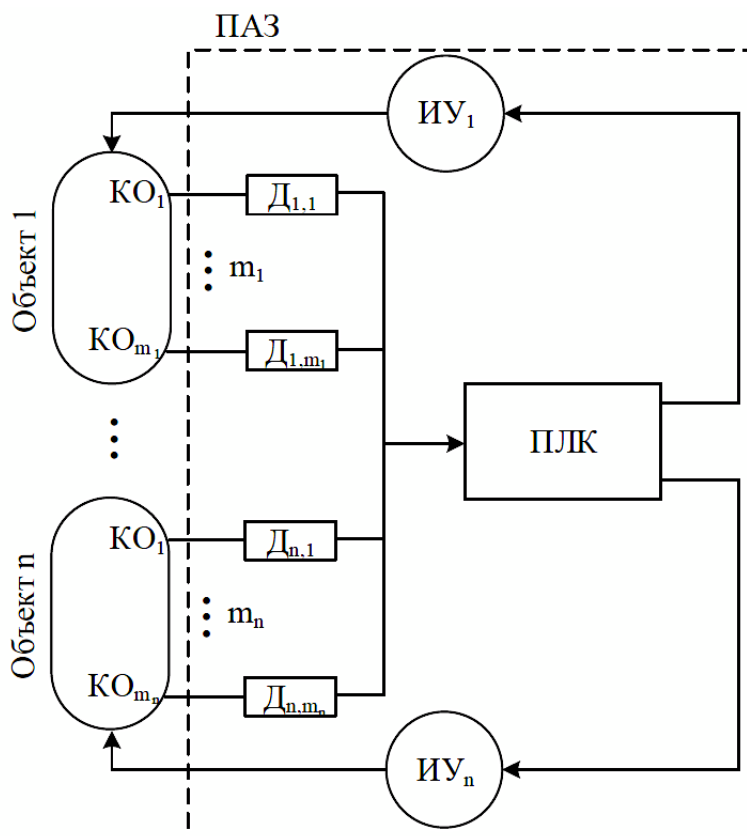


Рисунок 6. Функциональная схема многоканальной системы ПАЗ

В приведенной схеме каждый j -ый объект, входящий в группу Г, имеет m_j опасных технологических параметров. Для каждого s -ого опасного параметра указывается критическая область KO_s его значений.

Модуль синтеза оптимальной ПАЗ путём моделирования статистическим методом Монте-Карло (разыгрывание сценариев) определяет значение стоимостного функционала для каждого варианта исполнения ПАЗ и далее осуществляет выбор оптимального варианта ПАЗ, который минимизирует значение стоимостного функционала и формирует спецификацию системы ПАЗ.

Разработан и используется в проектировании и синтезе оптимальных систем ПАЗ отечественный «Программный модуль для расчета комплекса показателей безопасности, обеспечиваемый системой противоаварийной защиты» [7].

Заключение

Принципы построения надёжных, безопасных и оптимальных по стоимости систем ПАЗ можно свести к применению модулей НПЛ и сенсоров ВОД.

Список литературы:

1. Скляр, В. В. Обеспечение безопасности АСУТП в соответствии с современными стандартами: методическое пособие / В. В. Скляр. – Москва: «Инфра-Инженерия», 2018. – 384 с. – Текст: непосредственный.
2. Алеев, А. С. Диверсные защиты. Обеспечение разнообразия в проектировании аварийных защит атомных станций. / А. С. Алеев – Текст: электронный // Ядерная и радиационная безопасность. – 2015. – №6. – С. 452-453. – URL: <https://blog.secnrs.ru/wp-content/uploads/2015/07/june6.pdf> (дата обращения: 27.11.2025).
3. Андропов, Е. В. Повышение надёжности эксплуатации АЭС на основе реализации принципа разнообразия / Е. В. Андропов [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – № 3. – С. 33–44. – Текст: непосредственный.
4. ГОСТ Р 71474-2024. Комплексы технических средств непрограммируемой логики для построения систем защит и систем управления технологическими процессами на объектах электроэнергетики. Общие положения: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 июня 2024 г. № 868- ст: дата введения 2024-06-24. – Москва: Российский институт стандартизации, 2024. – 12 с. – Текст: непосредственный.
5. Буймистряк, Г. Я. Передовые технико-технологические решения для построения приборных систем безопасности атомных реакторов IV поколения / Г. Я. Буймистряк, А. В. Ильин // X Международная конференция «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии XXI века»: доклады (Минск, 28–31 мая 2024 г.). – Минск: ОИЭЯИ — Сосны НАН Беларуси, 2024. – С. 145–154. – Текст: непосредственный.
6. Буймистряк, Г. Я. Оптоволоконные измерительные каналы автоматизированных систем управления объектами атомной энергетики в экстремальных условиях / Г. Я. Буймистряк, А. В. Ильин, С. И. Сафонов // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2018. – № 9. – С. 52–58. – Текст: непосредственный.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021619068 Российская Федерация. Программный модуль для расчета комплекса показателей безопасности, обеспечиваемый системой противоаварийной защиты: №2021618301: заявл. 31.05.2021: опубл. 03.06.2021. / А. В. Карманов, К. П. Орлова. Правообладатель ФГОУ «Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина» – 1 с. – Текст: непосредственный.

© Буймистряк Г. Я., 2025

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМАХ ЭНЕРГЕТИКИ

магистрант **Садриев Рузаль Фаритович**,
науч. руководитель: д-р техн. наук, профессор
Гильфанов Камиль Хабибович,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматриваются современные подходы к интенсификации теплообмена в газожидкостных системах, характерных для энергетических установок с высокими тепловыми нагрузками. Показано, что управляемые гидродинамические флуктуации могут служить эффективным инструментом повышения интенсивности переноса энергии и вещества без существенного увеличения энергетических затрат, обеспечивая формирование оптимальной межфазной структуры и повышение общей эффективности работы оборудования.

Ключевые слова: теплообмен, газожидкостные системы, энергетика, турбулентность, интенсификация.

MODERN METHODS OF HEAT AND MASS TRANSFER INTENSIFICATION IN GAS-LIQUID ENERGY SYSTEMS

Master Student **Sadriev Ruzal Faritovich**,
Academic Advisor: Doctor of Technology, Professor
Gilfanov Kamil Khabibovich,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The paper considers modern approaches to the intensification of heat and mass transfer in gas-liquid systems typical of power plants with high thermal loads. It is shown that controlled hydrodynamic fluctuations can serve as an effective tool for increasing the intensity of energy and matter transfer without significantly increasing energy costs, ensuring the formation of an optimal interphase structure and increasing the overall efficiency of the equipment.

Keywords: heat and mass transfer, gas-liquid systems, energy, turbulence, intensification.

Современное развитие энергетики сопровождается ростом требований к компактности, надёжности и энергоэффективности оборудования, в котором процессы теплообмена между газовой и жидкой фазами играют ключевую роль. В условиях перехода к более высоким плотностям тепловых потоков и

повышенным тепловым нагрузкам возникает необходимость в создании методов, позволяющих целенаправленно усиливать интенсивность переноса энергии и вещества. Формирование оптимальных условий для межфазного взаимодействия требует глубокого понимания механизма связи гидродинамики с теплофизическими характеристиками рабочей среды. Традиционные способы интенсификации, основанные на повышении степени турбулизации, увеличении межфазной поверхности и использовании внешних воздействий, демонстрируют ограниченную эффективность и требуют переосмысления с учётом современных требований к энергетическим системам.

Газожидкостные системы характеризуются сложным многофакторным режимом переноса импульса, тепла и массы. При наличии развитых межфазных границ процесс определяется не только теплофизическими свойствами фаз, но и кинематикой диспергирования, скоростью коалесценции и геометрией структуры потока. Переход к более детальному описанию динамики межфазных взаимодействий показывает, что основным ограничением в интенсификации выступает не недостаточная площадь поверхности контакта, как считалось ранее, а недостаточно высокий уровень организованных флуктуаций, способных эффективно разрушать пограничные слои вблизи газовых включений и жидкой фазы. Это открывает возможность создания методов, направленных на целенаправленное формирование спектра флуктуаций, оптимального для конкретного типа теплообменного аппарата.

Классические методы интенсификации тепломассообмена, включающие использование насадок различных типов, форсуночное диспергирование, вибрационные воздействия и электромагнитные поля, имеют значительный технологический потенциал, но при их реализации нередко возникают побочные эффекты, такие как увеличение гидравлических потерь или нежелательная деградация структурной устойчивости потока. В современных условиях важной задачей становится разработка подходов, обеспечивающих повышение интенсивности переноса при минимальном росте энергетических затрат на организацию режима. Анализ существующих решений показывает, что наиболее перспективными являются методы, воздействующие на внутреннюю динамику газожидкостного потока на уровне мезоструктур. В частности, введение контролируемых псевдохаотических возмущений позволяет повысить эффективность теплообмена без существенного изменения среднего режима течения [1-3].

Новизна предлагаемого подхода заключается в использовании управляемых гидродинамических флуктуаций, формируемых через модуляцию локальных градиентов скорости вблизи межфазных границ. Такие флуктуации не приводят к избыточному росту общего уровня турбулентности, но создают устойчивые зоны интенсивного обновления пограничных слоёв. Экспериментальные исследования показывают, что воздействие на распределения скорости в диапазоне низкочастотных колебаний приводит к увеличению коэффициентов теплопередачи на 20–35 % при неизменных расходах и без заметного повышения давления. Этот эффект объясняется усилением относительного движения фаз, приводящим к более активному разрушению поверхностных диффузионных

слоёв, а также к улучшению условий перемешивания [4].

Для реализации принципа управляемых флуктуаций используется комбинация пассивных и активных элементов. Пассивные методы включают микроструктурирование стенок каналов, позволяющее формировать квазигармонические возмущения за счёт взаимодействия потока с локальными геометрическими неровностями. Активные методы основаны на модулированных акустических и вибрационных воздействиях, которые задают спектр колебаний, согласованный с естественными частотами газожидкостной системы. В отличие от традиционных вибрационных методов, направленных на однородное повышение турбулентности, предлагаемая технология использует узкополосные воздействия, что позволяет формировать оптимальные условия для разрушения тепловых пограничных слоев без избыточного увеличения энергии, затрачиваемой на возбуждение колебаний.

Особый интерес представляет влияние управляемой флуктуационной структуры на процессы массообмена. Для газожидкостных систем энергетики критически важными являются процессы десорбции, абсорбции и испарения, протекающие на границе фаз. Исследования показывают, что при генерации направленных флуктуаций межфазная поверхность демонстрирует более высокую устойчивость к коалесценции, что приводит к сохранению развитой дисперсной структуры. С точки зрения массообмена это означает увеличение коэффициентов переноса при снижении среднего диаметра газовых пузырьков и повышении их индивидуальной подвижности в объёме. При этом формирование устойчивых локальных вихревых структур создаёт благоприятные условия для ускорения обновления межфазных слоёв, что особенно важно для процессов испарения в высокотемпературных режимах.

Анализируя влияние новых методов на энергетические характеристики систем, можно отметить существенное снижение удельного расхода энергии на поддержание требуемых тепловых потоков. Экспериментальные данные подтверждают, что при использовании управляемых гидродинамических возмущений достигается более равномерное распределение температурных градиентов, что снижает термические напряжения в материалах теплообменных поверхностей. Это способствует увеличению ресурса оборудования и уменьшению вероятности отказов, связанных с нестационарными тепловыми нагрузками. Таким образом, интенсификация тепломассообмена обеспечивает не только повышение эффективности, но и улучшение эксплуатационных характеристик энергетических установок.

В условиях развития компактных энергетических систем и технологий переработки газожидкостных смесей особое значение приобретает интеграция методов интенсификации в конструкцию аппаратов. Моделирование на основе численных методов, включая крупноединичное моделирование турбулентности и многофазные подходы, подтверждает целесообразность комбинированного использования пассивных и активных средств воздействия. Особую роль играет согласование частотного спектра воздействий с характеристиками движения пузырьков, что позволяет избежать нежелательных резонансных процессов и минимизировать энергетические потери [5-6].

Перспективы дальнейших исследований связаны с переходом к адаптивным системам управления структурой межфазного взаимодействия, способным в реальном времени изменять параметры воздействия в зависимости от текущего состояния потока. Введение таких систем позволит оптимизировать процессы теплообмена в условиях переменных режимов работы энергетических установок и повысить их общую эффективность. Научная значимость предложенного подхода заключается в обосновании принципов формирования управляемых флуктуаций и демонстрации их способности выступать универсальным инструментом интенсификации теплообмена в газожидкостных системах различного типа.

Представленные результаты подтверждают, что целенаправленное воздействие на мезоуровень структуры газожидкостного потока открывает новые возможности для повышения эффективности теплоэнергетического оборудования. Управляемые гидродинамические флуктуации выступают перспективным направлением развития современных методов интенсификации, обеспечивая баланс между технической реализуемостью, энергетической эффективностью и стабильностью работы систем. Такой подход может стать основой для создания нового поколения аппаратов, ориентированных на высокие тепловые нагрузки и строгие требования к надёжности энергетических систем.

Список литературы:

1. Алексеенко, С. В. Исследование гидродинамики и теплообмена газожидкостных потоков в каналах малого диаметра / С. В. Алексеенко, Н. С. Хабеев, С. О. Попов // Теплофизика и аэромеханика. – 2019. – Т. 26, № 4. – С. 481–492.
2. Курасов, В. Н. Интенсификация теплообмена в пузырьковых колоннах при внешних воздействиях / В. Н. Курасов, И. В. Морозов // Теоретические основы химической технологии. – 2018. – Т. 52, № 3. – С. 305–314.
3. Гильфанов, К. Х. Способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования / К. Х. Гильфанов [и др.] // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, № 4 (56). – С. 91–102.
4. Гумеров, Д. М. Влияние колебательных воздействий на процессы теплообмена в двухфазных системах / Д. М. Гумеров, И. И. Хафизов, Р. Ш. Мансуров // Вестник Казанского технологического университета. – 2020. – Т. 23, № 7. – С. 45–52.
5. Фролов, С. В. Повышение эффективности теплообмена в энерготехнологических аппаратах путем управления структурой двухфазного потока / С. В. Фролов, А. В. Юрков // Теплоэнергетика. – 2018. – № 10. – С. 11–20.
6. Чернышев, В. В. Динамика межфазной поверхности и интенсификация массообмена в газожидкостных системах / В. В. Чернышев, Г. С. Бочкарев // Инженерно-физический журнал. – 2020. – Т. 93, № 2. – С. 367–376.

ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

студент **Харисов Амир Радикович**,
канд. техн. наук, доцент **Сандаков Виталий Дмитриевич**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается внедрение системы предиктивного обслуживания силовых трансформаторов как современный подход к управлению критическими активами в энергетике. Описывается переход от плановых ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию на основе непрерывного мониторинга ключевых параметров: температуры, вибрации и содержания газов в масле. Особое внимание уделяется использованию автоматических газоанализаторов и технологий искусственного интеллекта для ранней диагностики дефектов. Анализируются этапы внедрения системы и её экономический эффект, включающий предотвращение аварий, оптимизацию затрат на ремонт и увеличение срока службы оборудования.

Ключевые слова: предиктивное обслуживание, силовые трансформаторы, диагностика оборудования, мониторинг состояния, анализ растворенных газов (DGA), искусственный интеллект.

IMPLEMENTATION OF A PREDICTIVE MAINTENANCE SYSTEM FOR POWER TRANSFORMERS

Student **Kharisov Amir Radikovich**,
PhD of Technology, Associate Professor **Sandakov Vitaly Dmitrievich**,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The article discusses the implementation of a predictive maintenance system for power transformers as a modern approach to managing critical assets in the energy sector. The article describes the transition from scheduled repairs to condition-based maintenance based on continuous monitoring of key parameters: temperature, vibration, and gas content in the oil. Special attention is paid to the use of automatic gas analyzers and artificial intelligence technologies for early defect diagnostics. The article analyzes the stages of system implementation and its economic benefits, including the prevention of accidents, optimization of repair costs, and increase in equipment lifetime.

Keywords: predictive maintenance, power transformers, equipment diagnostics, condition monitoring, dissolved gas analysis (DGA), and artificial intelligence.

Современная энергетика стоит перед вызовом обеспечения бесперебойного и надежного электроснабжения в условиях старения основных фондов и растущих нагрузок. Силовые трансформаторы, являясь узловыми элементами сетевой инфраструктуры, требуют особого подхода к обслуживанию. Традиционная модель планово-предупредительных ремонтов, долгие годы бывшая стандартом, сегодня демонстрирует свою неэффективность. Она может не предотвратить внезапный отказ, ведущий к катастрофическим последствиям, или, наоборот, приводит к избыточному обслуживанию и неоправданным затратам на ремонт еще исправного оборудования. Эволюция подходов к обслуживанию прошла путь от реактивной модели, когда действия предпринимаются после отказа, через плановую, основанную на регламентных интервалах, к современной предиктивной парадигме [1]. Предиктивное обслуживание кардинально меняет философию управления активами: техническое обслуживание выполняется не по графику, а на основе точного прогноза будущего состояния оборудования, полученного в результате непрерывного мониторинга и анализа данных.

Ключевым элементом внедрения предиктивного обслуживания является создание комплексной системы мониторинга, отслеживающей критически важные параметры работы трансформатора в режиме реального времени. Температура обмоток и масла служит базовым индикатором [2]. Ее отклонения от нормы могут сигнализировать о перегрузках, неисправностях систем охлаждения или развитии внутренних дефектов, таких как ухудшение контактов. Мониторинг вибрации и акустической эмиссии позволяет выявлять механические проблемы: ослабление креплений активной части, деформацию обмоток или нештатную работу переключателя ответвлений. Однако наиболее информативным и ценным методом является анализ растворенных газов в масле. Различные дефекты внутри трансформатора, будь то перегревы, электрические дуги или частичные разряды, вызывают разложение трансформаторного масла с образованием характерных газов. Концентрация и соотношение ключевых газов, таких как водород, метан, ацетилен и этилен, образуют уникальную «подпись», позволяющую идентифицировать тип и серьезность дефекта. Прорывом в этой области стало появление автоматических онлайн-газоанализаторов, которые, в отличие от периодического лабораторного анализа проб, предоставляют данные непрерывно, что критически важно для обнаружения быстротекущих процессов.

Сам по себе поток данных с датчиков не дает готового решения. Обработка больших объемов информации возможна только с применением технологий искусственного интеллекта и машинного обучения. Алгоритмы ИИ способны автоматизировать сложную диагностику по данным газового анализа, с высокой точностью классифицируя тип дефекта на основе как классических методов, так и выявления скрытых закономерностей. На основе исторических данных и трендов ИИ строит прогнозные модели, оценивая скорость деградации изоляции и рассчитывая остаточный ресурс трансформатора [3]. Это позволяет системе генерировать не просто сигналы тревоги о превышении

порога, а интеллектуальные оповещения с указанием вероятной причины, оценкой критичности и конкретными рекомендациями по действиям для персонала.

Процесс внедрения системы предиктивного обслуживания является поэтапным и требует тщательного планирования. Он начинается с аудита парка трансформаторов и выделения наиболее критичных единиц по таким параметрам, как напряжение, мощность и роль в сети. На следующем этапе производится выбор и установка необходимого оборудования: датчиков температуры и вибрации, автоматических газоанализаторов и устройств сбора данных. Параллельно разворачивается программная платформа, которая обеспечивает прием, хранение, визуализацию и анализ информации, часто с возможностью интеграции в существующие SCADA и ERP-системы. Завершающим и самым важным этапом является внедрение алгоритмов искусственного интеллекта, обученных на исторических данных предприятия, и перестройка рабочих процессов и регламентов обслуживания в соответствии с новыми возможностями [4].

Был проведен сравнительный анализ стратегий обслуживания силовых трансформаторов (таблица 1).

Таблица 1. Сравнительный анализ

Критерий	Реактивное обслуживание	Плановое обслуживание (ППР)	Предиктивное обслуживание
Основа для ремонта	Отказ оборудования	Календарный график	Фактическое и прогнозируемое состояние
Вероятность аварии	Высокая	Сниженная	Минимальная
Затраты на ремонт	Максимальные (аварийные)	Средние (могут быть избыточными)	Минимальные (плановые по необходимости)
Использование ресурса	До полного отказа	Не всегда полное	Максимально полное
Основные технологии	Визуальный осмотр, ремонт после отказа	Лабораторный анализ проб (1-2 раза в год)	Непрерывный онлайн-мониторинг, ИИ, прогнозная аналитика

Таблица 2. Ключевые газы-маркеры и соответствующие им типы дефектов в трансформаторе

Газ-маркер	Химическая формула	Основные причины образования (типы дефектов)
Водород	H ₂	Низкотемпературные частичные разряды в масле, воздействие дуги на масло
Метан	CH ₄	Перегрев масла в диапазоне 400-600 °С.
Ацетилен	C ₂ H ₂	Высокотемпературная электрическая дуга (свыше 700 °С). Критический признак
Этилен	C ₂ H ₄	Высокотемпературный перегрев масла (500-800 °С)
Этан	C ₂ H ₆	Перегрев масла в диапазоне 300-400 °С
Оксид углерода	CO	Перегрев и старение целлюлозной изоляции
Двуокись углерода	CO ₂	Общее старение и перегрев целлюлозной изоляции

Проведенный анализ, в частности, данные, систематизированные в таблицах, наглядно демонстрирует, что внедрение системы предиктивного обслуживания – это не просто замена одного технического регламента на другой, а фундаментальная стратегическая трансформация всего подхода к управлению критическими активами в электроэнергетике.

Сравнительный анализ стратегий обслуживания из таблицы 1 однозначно свидетельствует о бесперспективности как реактивной, так и плановой моделей. Реактивная модель, ведущая к неизбежным катастрофическим отказам, неприемлема для современной надежной энергосистемы. Плановая же модель (ППР), хоть и снижает риски, оказывается экономически неэффективной, приводя к нерациональному использованию ресурса оборудования. Предиктивная модель, основанная на фактическом и прогнозируемом состоянии, позволяет совершить качественный скачок: она минимизирует вероятность аварии за счет раннего предупреждения и одновременно оптимизирует финансовые потоки, переводя затраты из категории «максимальные и непредсказуемые» (аварийные ремонты) в категорию «минимальные и плановые».

Ключевым инструментом, делающим этот переход возможным, является технология непрерывного мониторинга, центральное место в котором занимает

анализ растворенных газов (DGA). Таблица ключевых газов-маркеров и соответствующих им типов дефектов в трансформаторе (табл. 2) раскрывает диагностическую мощь этого метода, показывая, что каждый газ является точным маркером конкретных патологических процессов внутри трансформатора. Например, появление даже следовых количеств ацетилена (C_2H_2) служит недвусмысленным сигналом о наличии высокотемпературной электрической дуги – крайне опасного дефекта. Сочетание же окисей углерода (CO и CO_2) указывает на деградацию целлюлозной изоляции, то есть на процесс, определяющий общий срок жизни трансформатора.

Таким образом, интеграция данных из таблицы 2 в систему предиктивного анализа создает замкнутый цикл управления надежностью. Система не просто фиксирует концентрации газов; с помощью алгоритмов ИИ она интерпретирует их соотношение и динамику, ставит точный «диагноз» (например, «перегрев масла свыше $500^{\circ}C$ » или «частичные разряды в бумажно-масляной изоляции») и прогнозирует остаточный ресурс [5].

На основании этого можно сделать следующие ключевые выводы:

1) **Экономическая целесообразность.** Внедрение предиктивной системы – это высокоэффективная инвестиция, а не статья расходов. Она окупается за счет предотвращения одного крупного аварийного отказа, стоимость которого может многократно превышать затраты на оснащение всего парка трансформаторов.

2) **Управление жизненным циклом.** Система переводит управление активом из режима «латания дыр» в режим **проактивного управления его жизненным циклом**. Это позволяет обоснованно продлевать срок службы исправного оборудования и заблаговременно планировать капитальные ремонты или замену, оптимизируя долгосрочный бюджет.

3) **Повышение устойчивости энергосистемы.** В масштабах всей энергосети массовое внедрение таких систем ведет к значительному повышению общей надежности и устойчивости, минимизируя риски аварий.

Экономический эффект от внедрения предиктивной системы носит комплексный и значительный характер. Наиболее очевидной выгодой является предотвращение аварийных отказов, которые влекут за собой колоссальные затраты на ликвидацию последствий, замену оборудования и компенсацию ущерба потребителям. Не менее важна оптимизация затрат на ремонты, которые теперь планируются на ранних стадиях развития дефекта, когда их стоимость значительно ниже, и исключаются ненужные плановые вмешательства. Кроме того, повышается общая надежность энергосистемы, продлевается срок службы дорогостоящих активов и оптимизируются страховые взносы.

В итоге, переход к предиктивному обслуживанию силовых трансформаторов, подкрепленный данными непрерывного мониторинга и интеллектуальным анализом, является обязательным условием для построения цифровой, устойчивой и экономически эффективной энергетики будущего. Это эволюция от обслуживания по расписанию к управлению по состоянию, от борьбы с последствиями к предвидению и предотвращению проблем.

Список литературы:

1. Савельева, Д. А. Продвижение технического обслуживания силовых трансформаторов: смена парадигмы в сторону предсказательных алгоритмов / Д. А. Савельева // Технические и естественно-научные достижения современности: актуальные вопросы и разработки: сборник научных статей. – 2024. – С. 148–151.
2. Зенькович, М. В. Интеллектуальные технологии управления техническим обслуживанием в условиях высокотехнологичного производства / М. В. Зенькович // Современные информационные технологии управления предприятием – 2025: сборник материалов конференции. – 2025. – С. 150–156.
3. Соколов, А. А. Использование нейросетевых технологий для оценки состояния силовых трансформаторов / А. А. Соколов // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и использования: сборник научных статей. — 2025. — С. 1853–1856.
4. Шеломенцев, В. А. Разработка системы поддержки принятия решений для оценки технического состояния силовых трансформаторов / В. А. Шеломенцев, И. С. Сухачев, С. В. Сидоров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336, № 6. – С. 120–135.
5. Мынжасаров, Р. И. Цифровые двойники и предиктивное обслуживание в машиностроении: инновационные подходы к управлению жизненным циклом продукции / Р. И. Мынжасаров // Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. – Москва, 2025. – С. 186–191.

© Харисов А. Р., 2025

СИСТЕМА ПРЕДИКТИВНОГО АНАЛИЗА. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

студент **Широчин Алексей Александрович**,
студент **Жевнеров Ян Владимирович**,
студент **Тюрин Михаил Павлович**,
науч. руководитель: ст. преподаватель **Воюш Николай Викторович**,
Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрена система предиктивного анализа для оценки состояния энергооборудования и аргументирована необходимость ее использования для оптимизации энергосбережения. Описана архитектура системы, методы обработки и предобработки больших объемов данных, их сильные и слабые стороны. Рассмотрены ключевые проблемы системы и предложены методы их решения.

Ключевые слова: система предиктивного анализа, энергосбережение, архитектура системы, прогноз, техническое состояние.

PREDICTIVE ANALYSIS SYSTEM. ELECTRICITY CALCULATION

Student **Shirochin Aleksey Aleksandrovich**,
Student **Zhevnerov Yan Vladimirovich**,
Student **Tsiuryn Mikhail Pavlovich**,
Academic Advisor: Senior Lecturer **Voush Nikolay Viktorovich**,
Belarusian national technical university
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article discusses a predictive analysis system for assessing the condition of energy equipment and argues for its use in optimizing energy savings. It describes the system's architecture, methods for processing and pre-processing large amounts of data, and their strengths and weaknesses. The article also addresses key challenges faced by the system and proposes solutions.

Keywords: predictive analysis system, energy conservation, system architecture, forecast, technical condition.

«Предиктивный анализ данных – инструмент, который позволяет предприятиям предсказывать будущие события на основе анализа исторических данных и выявления скрытых закономерностей. В контексте производства эта технология позволяет прогнозировать различные сценарии, от потенциальных сбоев оборудования до колебаний спроса на продукцию» [1]. Поэтому при разработке систем предиктивного анализа (СПА) для электроэнергетических

систем необходимо применять передовые методы анализа данных, таких как искусственный интеллект и машинное обучение (рис. 1).



Рисунок 1. Структура предикативной аналитики [6]

В энергетических системах СПА применяют для поддержания оптимального состояния высоконагруженного оборудования, т. е. для оценки состояния оборудования и оптимизации распределения энергии с учетом факторов спроса и погодных условий. Для этого в СПА поступает неструктурированная телеметрическая информация в реальном масштабе времени от различных информационных и автоматизированных систем, а также учетных систем. Для большинства систем предиктивного анализа характерна следующая структура: импорт данных в систему; преобразование и подготовка данных; кластеризация для выявления тех данных, которые поступают затем в предиктивную модель; прогнозирование трендов и отказов на основе предиктивной модели [2].

Для оценки состояния энергооборудования в СПА используются методы обработки данных, позволяющие прогнозировать состояния и возможные отказы оборудования. В условиях растущей нагрузки на энергетическую инфраструктуру и необходимости оптимизации процессов обслуживания и эксплуатации такие системы становятся важным инструментом для эффективного управления техническими ресурсами и повышения надежности работы энергооборудования.

Процесс работы системы предиктивного анализа начинается с этапа сбора данных. В этом процессе используются различные источники информации, такие как данные от умных счетчиков, сенсоров, а также внешние переменные – погодные условия, сезонные колебания и даже календарные факторы (выходные и праздничные дни). В систему предиктивного анализа поступает информация в реальном времени от различных автоматизированных систем, а также учетных систем. Данные о потреблении электроэнергии, полученные с различных точек сети или от конечных пользователей, служат основой для

последующего анализа. Основной задачей на этом этапе является обеспечение точности и полноты собранных данных, поскольку неточные или неполные данные могут существенно повлиять на результаты предсказания.

После сбора данных на следующем этапе, при создании СПА – осуществляется предобработка данных. Данные очищаются от пропусков, аномальных значений и выбросов. Важно также учесть специфические факторы, которые могут существенно повлиять на потребление электроэнергии, такие как: изменения в температурных режимах или изменения в повседневных привычках потребителей. На данном этапе осуществляется подготовка данных к дальнейшему использованию. Для реализации СПА разработана структура (рис. 2), содержащая основные модули, реализующие один из ключевых подходов «Индустрии 4.0» кибер-физические объекты [3].

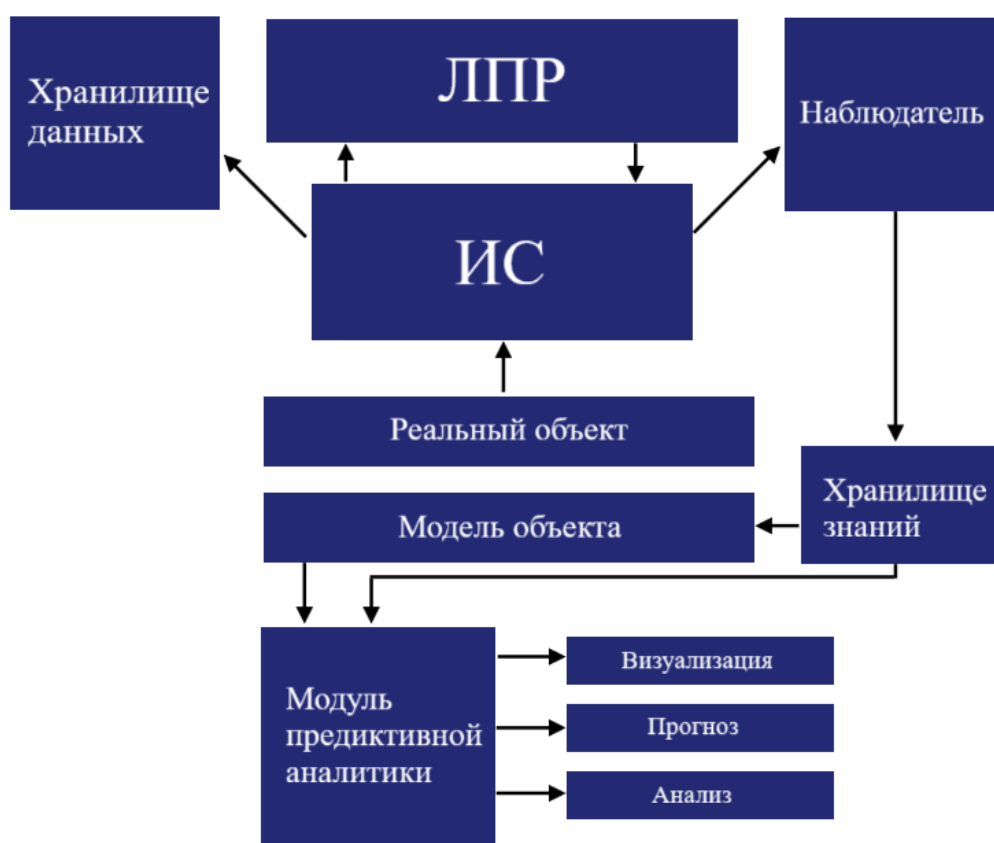


Рисунок 2. Структура системы предиктивной аналитики
[собственная разработка]

Основной проблемой при сборе измерительных данных при применении предиктивной аналитики является пропуск данных. В научных исследованиях представлено множество методов и алгоритмов для восстановления данных в случае пропусков [4]. Общей характеристикой этих методов является подход, заключающийся в заполнении отсутствующих значений, будь то одно или несколько пропущенных элементов. Решение проводилось для нескольких

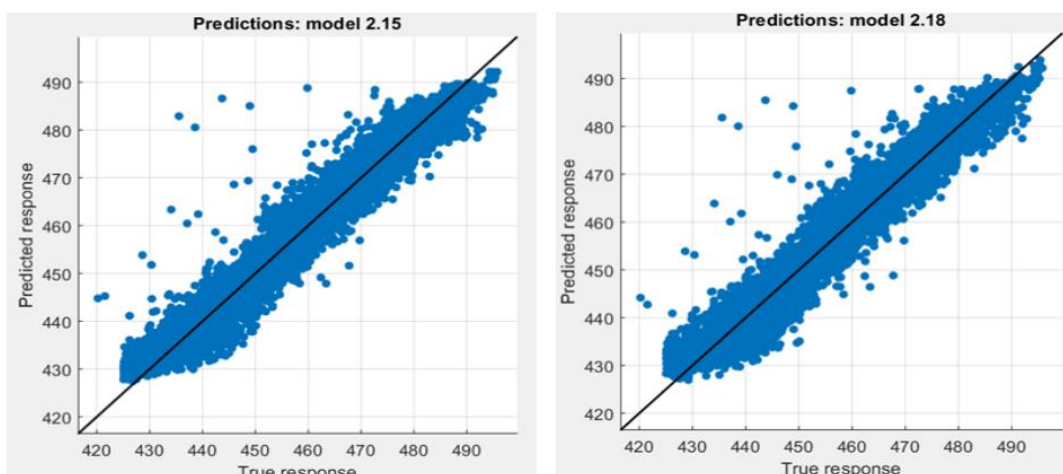
методов: Cubic, LinerSVM и искусственные нейронные сети с алгоритмом обучения Левенберга-Марквардта.

Таблица 1. Результаты экспериментов по применению алгоритмов восстановления пропусков

Пропуски	Регрессионные методы		Нейронная сеть	
	Алгоритм машинного обучения	СКО (RMSE)	Алгоритм машинного обучения	СКО (RMSE)
1 столбец (10%)	Cubic SVM	0.27517	Levenberg-Marquardt	0.82636
1 строка (10%)	Liner SVM	0.37958	Levenberg-Marquardt	1.64428
3 столбца (30%)	Liner SVM	0.31582	Levenberg-Marquardt	1.1475
3 строки (30%)	Liner SVM	0.19736	Levenberg-Marquardt	4.8081
5 столбцов (50%)	Liner SVM	0.35404	Levenberg-Marquardt	2.3039
5 строк (50%)	Linear Regression	0.38985	Levenberg-Marquardt	2.6446

Результаты таблицы показывают, что необходимо применять регрессионные модели, позволяющие решать задачи, связанные с восстановлением пропущенных данных, и наличием шумов и аномальных данных.

Система предиктивного анализа использует различные методы моделирования для прогнозирования потребления энергии. Среди наиболее популярных подходов – методы машинного обучения и статистического анализа, включая линейную и полиномиальную регрессию, временные ряды, нейронные сети и решающие деревья [5]. В качестве примера прогнозирования значений параметров покажем прогнозирование мощности в зависимости от значений. Для выбора наиболее подходящего метода прогнозирования были исследованы искусственные нейронные сети, SVM и алгоритм бэггинга деревьев принятия решений (рис. 3).



а) метод бэггинга деревьев решений

б) SVM-метод

Рисунок 3. Результаты прогноза с помощью методов:
а – метод бэггинга деревьев решений, *б* – SVM-метод [1]

Таким образом, системы предиктивного анализа в расчете электроэнергии становятся важным инструментом для управления энергоснабжением, что особенно актуально в условиях растущего потребления и необходимости перехода на более эффективные и устойчивые энергосистемы [6].

Однако мы выявили, что предиктивный анализ сталкивается с рядом ограничений. Основные проблемы включают:

1. Зависимость от качества исходных данных – высокая чувствительность моделей к точности входной информации. Для корректных прогнозов необходимы достоверные данные о потреблении, погоде, тарифах, ремонтах оборудования и других параметров. Данные часто содержат ошибки и пропуски, что снижает точность моделей и может приводить к неправильным управленческим решениям. Даже современные алгоритмы машинного обучения не способны полностью компенсировать низкое качество данных.

2. Высокие требования к вычислительным ресурсам. Современные алгоритмы анализа, особенно основанные на методах глубокого обучения, требуют значительных вычислительных мощностей и постоянного обновления инфраструктуры. Для небольших предприятий это может создавать финансовые трудности и ограничивает возможности по внедрению данной технологии.

Для решения первой проблемы необходимо обеспечить надежный и бесперебойный сбор данных, а также использовать эффективные методы их очистки и обработки, чтобы минимизировать риск искажения информации. Также необходимая «очистка» ненужных данных и фильтрация аномальных значений поможет значительно снизить объем вычислений, что позволит решить проблему, связанную с недостатком вычислительных ресурсов.

Для решения второй проблемы можно применять более легкие алгоритмы и кэширование.

Использование более легких и быстрых алгоритмов позволит использовать менее ресурсоемкие методы, такие как линейная регрессия или

дерево решений, что позволит ускорить процессы без потери точности, а кэширование часто запрашиваемых данных и использование заранее подготовленных прогнозов для быстрого ответа на запросы поможет избежать повторных вычислений [7].

Таким образом, несмотря на существующие ограничения и вызовы, системы предиктивного анализа имеют большой потенциал для оптимизации энергосбережения, повышения энергоэффективности и улучшения работы энергетических сетей.

Список литературы:

1. Андрияшин А. В., Щербатов И. А., Цуриков Г. Н., Титов Ф. М. Система предиктивной аналитики для энергетических объектов. – Текст: электронный – URL: https://mlsd2019.ipu.ru/proceedings_1/section_7/566-570.pdf (дата обращения: 23.10.2025).
2. Горшков Д. О. Классификация прогнозов в электроэнергетике. – Текст: электронный // СтройМного. – 2015. – №1 (1). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-prognozov-v-elektroenergetike/viewer> (дата обращения: 27.10.2025).
3. Моргоева А. Д., Моргоев И. Д., Ключев И. В., Гаврина О. А. Прогнозирование потребления электрической энергии промышленным предприятием с помощью методов машинного обучения. – Текст: электронный – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognostirovanie-potrebleniya-elektricheskoy-energii-promyshlennym-predpriyatiem-s-pomoschyu-metodov-mashinnogo-obucheniya/viewer> (дата обращения: 03.11.2025).
4. Файзуллин Р. Н., Козлов В. К. Цифровизация в электроэнергетике: проблемы и перспективы развития. – Текст: электронный – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-v-elektroenergetike-problemy-i-perspektivy-razvitiya/viewer> (дата обращения: 11.11.2025).
5. Бердиназарова А., Кулиев Э., Атадурдыев Г. Технологии кэширования данных: оптимизация производительности в компьютерных системах. – Текст: электронный – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-keshirovaniya-dannyh-optimizatsiya-proizvoditelnosti-v-kompyuternyh-sistemah/viewer?ysclid=mi80gfokuq865782945> (дата обращения: 15.11.2025).
6. Предсказали поведение пользователей и повысили эффективность вложений в маркетинг. – Текст: электронный – URL: <https://medianation.ru/cases/predskazali-povedenie-polzovateley-i-povysili-effektivnost-vlozheniy-v-marketing/> (дата обращения: 11.11.2025).
7. Предиктивная аналитика: что это такое и какие задачи решает. – Текст: электронный – URL: <https://www.in-aim.ru/blog/prediktivnaya-analitika-cto-eto-takoe-i-kakie-zadachi-reshaet/> (дата обращения: 11.11.2025).

© Широчин А. А., Жевнеров Я. В., Тюрин М. П., 2025

МАЛЫЕ МОДУЛЬНЫЕ РЕАКТОРЫ: СТРАТЕГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ В ТРАНСФОРМАЦИИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТИ

студент **Журова Инна Сергеевна**,
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена исследованию стратегического потенциала малых модульных реакторов (ММР) в трансформации атомной энергетики и укреплении энергобезопасности. Анализируются ключевые преимущества ММР, включая повышенную безопасность за счет пассивных систем, снижение капитальных затрат и сроков строительства благодаря заводскому изготовлению, а также возможность декарбонизации удаленных регионов и когенерации. Выявляются основные вызовы для их широкого внедрения, такие как текущая экономическая конкурентоспособность и необходимость адаптации нормативной базы, и делается вывод о преобразующей роли ММР в глобальной энергетике.

Ключевые слова: малые модульные реакторы (ММР), атомная энергетика, энергобезопасность, декарбонизация, пассивные системы безопасности, модульное строительство.

SMALL MODULAR REACTORS: THE STRATEGIC POTENTIAL IN TRANSFORMING NUCLEAR ENERGY AND ENERGY SECURITY

Student **Zhurova Inna Sergeevna**,
Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russian Federation

Abstract. This article examines the strategic potential of Small Modular Reactors (SMRs) in transforming the nuclear energy sector and enhancing energy security. It analyzes key SMR advantages, including enhanced safety through passive systems, reduced capital costs and construction times from factory production, and their application for decarbonizing remote regions and cogeneration. The study identifies main deployment challenges, such as economic competitiveness and adapted regulatory frameworks, while concluding on transformative role of SMRs in the global energy landscape.

Keywords: Small Modular Reactors (SMRs), nuclear energy, energy security, decarbonization, passive safety systems, modular construction.

В контексте общемирового курса на декарбонизацию при одновременном росте энергопотребления потенциал атомной энергетики подвергается стратегическому переосмыслению. Несмотря на то, что объекты большой

атомной генерации представляют собой источник низкоуглеродной электроэнергии, их развитие сопряжено с рядом системных ограничений, включая проблемы обеспечения безопасности, обращения с радиоактивными отходами и высокой капиталоемкости строительства. Современная атомная электростанция представляет собой технологически сложный комплекс, состоящий из множества взаимосвязанных сооружений, инженерных систем и дублирующих контуров безопасности, что обуславливает значительную капиталоемкость и продолжительные сроки ее сооружения [1, с. 60].

Следствием необходимости преодоления указанных ограничений выступает активизация разработок в области прорывных технологических решений, нацеленных на повышение уровня безопасности, экономической эффективности и адаптивности атомной генерации. К числу наиболее перспективных и практичных векторов технологического развития в данной сфере относится создание малых модульных реакторов (ММР) [2, с. 70].

Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) определяет малые модульные реакторы (ММР) как ядерные установки мощностью до 300 МВт, ключевой особенностью которых является заводская готовность основных модулей, доставляемых на площадку для финальной сборки. По своей выходной мощности они примерно в три раза меньше стандартных реакторов АЭС [3]. Это способствует значительному сокращению сроков и капитальных затрат на строительство [5, с. 134]. Указанные характеристики определяют стратегические преимущества ММР. Производство в контролируемых заводских условиях обеспечивает эталонную стандартизацию и воспроизводимость качества, что труднее достичь при строительстве на площадке. Дополнительным операционным преимуществом служит модульность: добавление энергоблоков позволяет увеличивать генерацию в соответствии с текущей динамикой спроса [4].

Помимо экономических и конструктивных преимуществ, важнейшим аспектом является повышенный уровень безопасности ММР, обеспечиваемый широким применением пассивных систем аварийного расхолаживания и остановки реактора. Подобное конструктивное решение также демонстрирует экономическую эффективность, поскольку эксплуатация пассивных систем не сопряжена со значительными первоначальными инвестициями [1, с. 60]. Принцип их действия основан на использовании фундаментальных физических явлений, таких как естественная циркуляция теплоносителя (конвекция) и сила тяжести. Например, аварийное поглощение нейтронов и остановка цепной реакции может осуществляться за счет самопроизвольного падения стержней-поглотителей в активную зону, а отвод остаточного тепла – за счет самостоятельной циркуляции теплоносителя через теплообменники [5, с. 134; 6, с. 9]. Такая конструктивная особенность обеспечивает функционирование систем безопасности полностью автономно, без необходимости вмешательства оператора или подключения к внешним источникам энергоснабжения. Это кардинально снижает вероятность развития тяжелых аварий, связанных с отказом активных систем или человеческим фактором. Высокая степень надежности пассивных систем, доказанная в ходе проектных и расчетных

работ, позволяет в перспективе существенно сократить размеры зон планирования защитных мероприятий вокруг станций на базе ММР, что открывает возможности для их размещения вблизи энергопотребителей [7, с. 91].

Именно компактность и повышенная безопасность открывают для ММР новые, уникальные ниши применения. Гибкость и меньший размер расширяют ценностное предложение атомной энергетики, делая их пригодными для энергоснабжения удаленных и труднодоступных регионов, а также для питания локальных промышленных объектов, где использование крупномасштабных АЭС технологически или экономически нецелесообразно [2, с. 70; 5, с. 134]. Особую значимость данное направление представляет для Российской Федерации, где порядка 67 % пространства составляют территории с локальными децентрализованными системами энергообеспечения, которые обеспечивают жизнедеятельность не менее 10 миллионов граждан [8, с. 46]. Также ММР могут интегрироваться в существующие энергосистемы или функционировать в автономном режиме, что особенно актуально для районов со слаборазвитой сетевой инфраструктурой. Важным функциональным свойством, обеспечивающим эффективную интеграцию, является высокая регулировочная способность, или маневренность. ММР демонстрируют скорость изменения мощности до 1 % в секунду, что позволяет гибко адаптировать их работу под переменные параметры энергосистемы, компенсируя, например, неравномерность выработки возобновляемых источников энергии [7, с. 91]. Таким образом, атомные станции малой мощности предлагают технологический прорыв в области энергоснабжения труднодоступных районов, а конструктивная компактность, экономичное водопользование и увеличенные интервалы между перегрузками топлива существенно упрощают задачи транспортного обеспечения и снижают затраты на создание инфраструктуры.

В рамках класса ММР выделяются еще более компактные решения – микромодульные реакторы. Одной из разновидностей АСММ являются микромодульные реакторы мощностью до 10 МВт, оптимальные для обеспечения энергией изолированных населенных пунктов и критической инфраструктуры в чрезвычайных ситуациях [2, с. 134; 3, с. 9]. Благодаря минимальным требованиям к занимаемой площади, микрореакторы превосходят прочие ММР по применимости в зонах с дефицитом надежного и доступного низкоуглеродного энергоснабжения. Согласно данным МАГАТЭ, дополнительным преимуществом является их использование в качестве резервных генерирующих мощностей в условиях ЧС [3].

Функциональный потенциал ММР выходит далеко за рамки традиционной электрогенерации. Реакторы способны функционировать в когенерационном режиме, параллельно решая задачи опреснения морской воды, генерации водорода, газификации угольных месторождений и выработки энергии. Утилизация тепловых отходов таких установок открывает перспективы формирования искусственных биокомплексов в регионах с экстремальными природными условиями. Экономический эффект от

комбинированной выработки демонстрирует синергетический потенциал – рентабельность может превышать показатели исключительно электроэнергетического использования в 3-3,5 раза [8, с. 46-47].

Экономическое обоснование ММР в значительной степени базируется на модели серийного заводского производства, которая, как ожидается, позволит реализовать кривые обучения и эффект масштаба за счет стандартизации и унификации модулей, что в перспективе должно снизить удельные издержки. Меньший объем требуемых первоначальных инвестиций и прогнозируемо короткие сроки сооружения снижают финансовые риски, делая атомную энергетику доступной для более широкого круга стран и инвесторов [6, с. 9]. Стратегическая ценность рассматриваемых решений особенно значима для развивающихся стран, осуществляющих построение национальной атомной энергетики в условиях инвестиционных вызовов. Конкурентные экономические преимущества формируются за счет следующих компонентов: оптимизации капитальных затрат через вынесение топливной инфраструктуры за пределы основных производственных мощностей; внедрения стандартизированных административных процедур для серийно выпускаемых энергетических установок [8, с. 46-47]; и повышения операционной эффективности благодаря реализации пролонгированных топливных циклов длительностью до 10 лет, что существенно превышает показатели традиционной атомной энергетики, требующей перегрузки топлива каждые 1-2 года [3].

Однако на текущем этапе ключевым вызовом остается высокая расчетная стоимость электроэнергии, вырабатываемой пилотными проектами ММР. Так, в изолированных системах удельная стоимость проектов, таких как Toshiba 4S (10 МВт) и российская ПАТЭС «Академик Ломоносов», составляет 36 и 60 рублей за кВт/ч соответственно [5, с. 135-136], что в настоящее время неконкурентоспособно по сравнению с дизельной генерацией (25 рублей за кВт/ч) [9]. Однако прогнозная траектория стоимости энергии ММР, по данным австралийских аналитиков, демонстрирует значительный потенциал оптимизации: с 258 долларов/МВт·ч в 2020 году до 127 долларов/МВт·ч к 2050 году, что означает уменьшение в два раза, что обеспечит превосходство над углеводородным топливом [8, с. 47]. Важно учитывать, что эти цифры представляют собой усредненные ориентиры, тогда как реальные экономические показатели будут существенно варьироваться в зависимости от географической локации и целевого назначения конкретной станции.

Одной из причин, сдерживающих снижение затрат, является неадаптированная нормативно-правовая база. Применение к ММР столь же строгих регуляторных требований, что и к крупным АЭС, несмотря на их принципиально иные показатели безопасности, приводит к их высокой стоимости [5, с. 136]. Международное сообщество и регулирующие органы сталкиваются с необходимостью адаптации нормативно-правовой базы, изначально разработанной для крупномасштабных реакторов, к специфике ММР. Это касается как процессов лицензирования, особенно для конструкций Поколения IV с альтернативными теплоносителями, так и применения международных конвенций об ответственности за ядерный ущерб к мобильным

установкам, таким как плавучие АЭС [6, с. 10]. Существенным препятствием для формирования единых отраслевых стандартов становится плюрализм технологических платформ ММР, разрабатываемых различными производителями. Подобная ситуация создает барьеры для унификации технических решений и замедляет консолидацию рынка вокруг ограниченного числа ключевых игроков [7, с. 91].

Несмотря на эти вызовы, развитие ММР поддерживается на государственном уровне в ряде стран, включая Великобританию, Канаду, США и Россию, где реализуются программы финансирования, разрабатываются «дорожные карты» и адаптируются процедуры лицензирования [5, с. 136-137; 6, с. 10]. В частности, российская государственная корпорация «Росатом» занимает уникальную позицию на мировом рынке, комбинируя экспорт технологий, проверенных в реальной эксплуатации на атомном ледокольном флоте (КЛТ-40С, РИТМ-200), с активной разработкой перспективного портфеля проектов следующего поколения, включая СВБР-100, «Витязь» и БЕРЕСТ-300. Данная стратегия позволяет предлагать заказчикам комплексные решения «под ключ» с прогнозируемо коротким циклом реализации – от 6 до 10 лет, что является значимым конкурентным преимуществом. При этом проекты адаптируются под специфические задачи потребителей, что наглядно демонстрируют планы по энергообеспечению удаленных горнодобывающих предприятий в регионах Якутии и Чукотки [5, с. 137-138]. Принцип адаптации технологических решений под требования заказчика наглядно иллюстрирует опыт реализации ядерной программы Иордании. Первоначальные планы по сооружению крупной АЭС мощностью 2000 МВт были скорректированы вследствие экономической нецелесообразности и ограниченной пропускной способности энергосистемы. В результате был выбран проект российской АСММ номинальной мощностью 200 МВт, предусматривающий наряду с электрогенерацией опреснение морской воды [8, с. 48].

Таким образом, малые модульные реакторы представляют собой не просто эволюционное улучшение, а качественный сдвиг в парадигме атомной энергетики. Их ключевая ценность заключается в способности решать задачи, малодоступные для крупной генерации: обеспечение энергией децентрализованных и удаленных регионов, интеграция в системы когенерации и создание устойчивых низкоуглеродных энергоостровов.

Основной вывод состоит в том, что стратегический потенциал ММР реализуется на стыке повышенной безопасности (благодаря пассивным системам), сниженных финансовых рисков (за счет модульности и заводского изготовления) и операционной гибкости. Это формирует уникальное ценностное предложение для укрепления энергобезопасности, особенно для стран с развивающейся энергетикой или обширными территориями без развитых сетей.

Однако переход от пилотных проектов к массовому внедрению требует преодоления критических барьеров. Ключевыми условиями для раскрытия потенциала ММР станут: 1) достижение экономической конкурентоспособности через серийное производство и эффект масштаба; 2)

разработка адаптированных и гармонизированных на международном уровне регуляторных рамок; 3) формирование глобального сотрудничества в области стандартов и цепочек поставок. В целом, ММР – это стратегический технологический актив для глобальной декарбонизации. Их успешное внедрение способно трансформировать атомную энергетику из источника базовой нагрузки в гибкий, адаптивный и социально ориентированный инструмент устойчивого развития.

Список литературы:

1. Паршин, А. А. Малые модульные реакторы – доступное и гибкое производство электроэнергии // EurasiaScience. – 2021. – С. 60–60. – Текст: непосредственный.
2. Овезмырадов, Э. Новые материалы и технологии в энергетике / Э. Овезмырадов, Р. Гылычдурдыев, А. Чарыев // Научные открытия 2024: сборник материалов LV международной очно-заочной научно-практической конференции. – Москва: Империя, 2024. – С. 68–71. – Текст: непосредственный.
3. Что такое малые модульные реакторы (ММР)? // Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ). – URL: <https://www.iaea.org/ru/newscenter/news/chto-takoe-malye-modulnye-reaktory-mmr> (дата обращения: 19.10.2025). – Текст: электронный.
4. Малые, надежные, эффективные // Росатом Ньюслеттер. – 2025. – 26 нояб. – URL: <https://rosatomnewsletter.com/ru/2025/11/26/small-reliable-and-efficient/> (дата обращения: 19.10.2025). – Текст: электронный.
5. Иванченко, И. Д. Малые модульные реакторы / И. Д. Иванченко, В. А. Леонов // Энергетика, управление и автоматизация: инновационные решения проблем: сборник статей. – 2023. – С. 133–138. – Текст: непосредственный.
6. Малые модульные реакторы: аналитический обзор / Госкорпорация «Росатом». – URL: https://www.rosatom.ru/upload/docs/Small_Modular_Reactors.pdf (дата обращения: 20.10.2025). – Текст: электронный.
7. Абросимов, Д. В. Малые модульные реакторы: плюсы и минусы // Энергия-2022: сборник статей. – 2022. – С. 91–91. – Текст: непосредственный.
8. Еремин, А. В. Возможности малых модульных реакторов // Инновационные процессы в научной среде: материалы Международной (заочной) научно-практической конференции (Прага, 16 июня 2021 года) / под общ. ред. А. И. Вострецова. – Нефтекамск: Научно-издательский центр «Мир науки», 2021. – С. 45–49. – Текст: непосредственный.
9. Сравнение стоимости 1 кВт·ч электроэнергии при собственной генерации на газе, дизеле, солнечных и ветряных установках // Энергострана.ру. – URL: <https://energostrana.ru/publications/sravnienie-stoimosti-1-kvt-elektroenergii-pri-sobstvennoj-generacii-na-gaze-dizele-solnechnyx-i-vetryanyx-ustanovkax.html> (дата обращения: 25.10.2025). – Текст: электронный.

© Журова И. С., 2025

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В КАЧЕСТВЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ АЛЬТЕРНАТИВЫ ТРАДИЦИОННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

студент **Расчислова Софья Андреевна**,
магистр **Абдуллина Азалия Айратовна**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент **Хамитова Динара Вилевна**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена анализу технологий аккумулирования энергии как ключевого инструмента интеграции возобновляемых источников в энергосистему. Проведен сравнительный обзор механических, электромагнитных, электрохимических и тепловых накопителей, выявлены их преимущества и ограничения. На основе анализа обоснованы конкурентные преимущества тепловых накопителей: безопасность, долговечность, экономичность и масштабируемость. В качестве практического решения предложена оригинальная конструкция теплового аккумулятора на основе шамота, предназначенная для повышения энергоэффективности за счет работы в режиме ночного заряда и дневной разрядки.

Ключевые слова: тепловой накопитель, аккумулирование энергии, энергия, энергоэффективность, энергетика.

USING THERMAL ENERGY STORAGE AS A PROMISING ALTERNATIVE TO TRADITIONAL TECHNOLOGIES

Student **Raschislova Sofya Andreevna**,
Master student **Abdullina Azalia Ayratovna**,
Academic Advisor: PhD in Technology, Associate Professor
Khamitova Dinara Vilevna,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The work is devoted to the analysis of energy storage technologies as a key tool for integrating renewable sources into the power system. A comparative review of mechanical, electromagnetic, electrochemical, and thermal storage devices is conducted, and their advantages and limitations are identified. Based on the analysis, the competitive advantages of thermal storage devices are substantiated: safety, durability, cost-effectiveness, and scalability. As a practical solution, an original design of a thermal accumulator based on fireclay is proposed, designed to improve energy efficiency by operating in a night charge and day discharge mode.

Keywords: thermal storage, energy accumulation, energy, energy efficiency, and power engineering.

Современный этап развития энергетики характеризуется поиском путей преодоления фундаментальных противоречий, присущих сложившейся системе. С одной стороны, традиционная генерация на основе углеводородов: угля, нефти и газа – обеспечивает стабильность энергоснабжения, но с неизбежными экологическими издержками – выбросами парниковых газов, загрязнением атмосферы и сопутствующим ускорением глобальных климатических изменений. С другой стороны, возобновляемые источники энергии (ВИЭ), такие как солнце, ветер и вода, предлагают экологически чистую альтернативу, снижая нагрузку на окружающую среду и ослабляя зависимость от исчерпаемых ресурсов [1]. Однако их широкое внедрение сдерживает ключевой технологический вызов природной изменчивости и непостоянства, ведущие к прерывистому и непредсказуемому характеру выработки. Так, эффективность солнечных электростанций напрямую зависит от времени суток и погодных условий, а ветрогенераторы требуют соблюдения определённого диапазона скоростей ветра.

Данное противоречие между экологической целесообразностью и надёжностью поставок формирует центральную проблему энергетического перехода. Решение данной проблемы лежит в области создания эффективных, экономичных и масштабируемых систем аккумулирования энергии, способных выполнять функцию буфера: накапливать избытки энергии в периоды пиковой генерации и отдавать их в моменты спада или повышенного спроса [2]. Интенсивный поиск таких решений сформировал современную технологическую базу, предлагающую широкий спектр подходов – от суперконденсаторов и проточных батарей до термальных накопителей, каждый из которых обладает уникальным набором характеристик. Для систематического анализа все многообразие методов хранения энергии можно классифицировать по физической природе процесса на четыре основные группы: механические, электромагнитные, электрохимические (химические) и тепловые.

Механические накопители используют фундаментальные законы классической механики для преобразования и сохранения энергии. В их основе лежит аккумуляция потенциальной или кинетической энергии. К первому типу относятся гидроаккумулирующие электростанции и гравитационные системы, запаасающие энергию путем подъема грузов на высоту. Ярким примером инновационного подхода в этой области является швейцарско-американский проект Energy Vault, запущенный в 2022 году [3]. Его система использует краны на возобновляемой энергии для подъема многотонных бетонных блоков, формируя искусственную башню. При необходимости генерации блоки опускаются, и их потенциальная энергия преобразуется в кинетическую, приводя в действие генераторы. Ко второму типу относятся системы, аккумулирующие кинетическую энергию во вращающихся маховиках, или энергию упругой деформации в сжатых газах или растянутых материалах [4]. Главными достоинствами механических систем являются огромная мощность, до нескольких ГВт, длительный срок службы и высокая надежность. Однако их распространение часто ограничивается необходимостью особых

географических условий, высокими капитальными затратами и длительным сроком окупаемости.

Второй крупный класс – электрохимические накопители, принцип действия которых основан на обратимых окислительно-восстановительных реакциях [5]. При заряде электрическая энергия преобразуется в химическую, а при разряде происходит обратный процесс. Конструктивно такие устройства состоят из трех ключевых компонентов: анода, катода и электролита, который за счет диссоциации на ионы обеспечивает ионную проводимость. К данному типу относятся широко распространенные литий-ионные и свинцово-кислотные аккумуляторы, а также перспективные проточные редокс-батареи. Их главные преимущества – высокая плотность запасаемой энергии, компактность и способность к быстрому отклику, что делает их оптимальным решением для резервного питания и сглаживания пиковых нагрузок. Однако эти системы имеют фундаментальные ограничения: ограниченный срок службы, деградация емкости со временем, необходимость сложной утилизации и чувствительность к температурным режимам, что создает значительные эксплуатационные и экологические проблемы.

В отличие от них, электромагнитные накопители оперируют энергией, запасенной непосредственно в электромагнитном поле. Наиболее совершенной их разновидностью являются сверхпроводящие магнитные накопители (SMES), способные отдавать огромную мощность практически мгновенно – за миллисекунды [6]. Это делает их бесценным инструментом для решения задач высочайшей скорости: мгновенной стабилизации частоты и напряжения, компенсации кратковременных провалов мощности и повышения качества электроэнергии. Ярким примером успешной реализации служит система из шести SMES, установленная компанией American Superconductor в 2000 году для стабилизации сети в Северном Уинстоне (США) [7]. Работая при температурах около 4,2 К, она эффективно сглаживала колебания в изолированной сети, компенсируя провалы напряжения при подключении дизель-генераторов. Проект доказал высокую эффективность технологии для удаленных регионов с нестабильными сетями, однако ее массовому внедрению препятствуют чрезвычайно высокая стоимость, необходимость в сложной криогенной инфраструктуре и относительно низкая плотность запасаемой энергии.

В противоположность сложным электрохимическим и требующим экстремальных условий электромагнитным системам, тепловые накопители энергии предлагают принципиально иной подход, основанный на аккумулировании тепла. Эти системы предназначены для захвата тепловой энергии в периоды её избытка, например, от солнечных коллекторов или в часы низкого тарифа на электроэнергию, с последующей отдачей в моменты повышенного спроса или отсутствия генерации. Ключевое преимущество данной технологии заключается в её экологической и эксплуатационной безопасности, так как в большинстве случаев не используются токсичные или дефицитные материалы. В качестве рабочего тела применяются доступные вещества с высокой теплоёмкостью: вода, различные солевые составы

(расплавы солей) или природные материалы, такие как керамика, камень или специально обработанная глина – шамот [8]. Эти материалы отличаются стабильностью при многократных циклах нагрева и охлаждения, долговечностью и низкой стоимостью, что обеспечивает высокую экономическую эффективность и масштабируемость решений. Важной особенностью тепловых накопителей является их универсальность и способность к интеграции в широкий спектр энергосистем – от бытовых солнечных установок и тепловых насосов до крупных гелиоконцентраторов (CSP) и промышленных теплоэлектроцентралей.

Каждая из рассмотренных технологий занимает свою нишу в энергосистеме, определяемую балансом её достоинств и недостатков. Для наглядного сравнения ключевых параметров различных методов аккумулирования энергии сведём их в таблицу 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ методов накопления энергии

№	Вид накопителя энергии	Способ накопления	Достоинства	Недостатки
1	Механические	Преобразование энергии через движение или высоту	1) Высокая мощность (ГВт); 2) Долгий срок службы (десяtkи лет).	1) Требуют особых географических условий; 2) Высокие капитальные затраты; 3) Длительная окупаемость.
2	Электромагнитные	Энергия электромагнитного поля	1) Мгновенный отклик; 2) Высокий КПД; 3) Многократные циклы.	1) Ограниченная емкость; 2) Высокая стоимость; 3) Необходимость криогенного охлаждения.
3	Электрохимические	Обратимые окислительно-восстановительные реакции	1) Высокая энергоемкость; 2) Компактность; 3) Широкое применение.	1) Ограниченный срок службы; 2) Дегградация емкости; 3) Проблемы утилизации.
4	Тепловые	Тепловая энергия в материалах	1) Высокая плотность энергии; 2) Долгий срок службы; 3) Экологичность; 4) Низкая стоимость материалов.	1) Теплотери; 2) Сложность преобразования тепла в электричество.

Таким образом, проведенный анализ позволяет выделить тепловые накопители в отдельный класс перспективных решений. Их ключевые преимущества: экологическая безопасность, отсутствие токсичных

компонентов, долговечность, масштабируемость и сравнительно низкая стоимость. Они создают прочный фундамент для широкого внедрения в энергосистемы различного уровня. Универсальность технологии позволяет ей эффективно дополнять как возобновляемые источники, компенсируя их нестабильность, так и традиционные сети, повышая их экономическую эффективность за счет работы в режиме выравнивания суточных нагрузок. Стабильность характеристик на протяжении десятилетий, в отличие от деградирующих электрохимических систем, обеспечивает долгосрочную надежность и снижает затраты на жизненный цикл.

Исходя из этого, авторами в качестве практической реализации концепции предлагается конструкция теплового аккумулятора на основе шамота (рис. 1). Принцип его работы ориентирован на повышение экономической эффективности энергоснабжения за счет использования дифференцированных тарифов на электроэнергию. В периоды действия льготных ночных тарифов включаются трубчатые нагреватели 5, которые осуществляют нагрев рабочего аккумулирующего тела 4, выполненного из шамота – огнеупорной керамики с высокой теплоемкостью и термостабильностью. Для минимизации тепловых потерь в окружающую среду аккумулирующий блок защищен двухслойной изоляцией: первый изоляционный слой 3 и второй изоляционный слой 2, состоящий из комбинации стальных пластин и минеральной ваты. Вся эта конструкция размещена в защитном корпусе 1. Накопленная тепловая энергия может быть впоследствии отведена через встроенный теплообменник 6 для нужд потребителей в дневное время, когда стоимость электроэнергии существенно выше. Предлагаемая конструкция сочетает в себе достоинства тепловых накопителей – безопасность, долговечность и экономичность, делая её практичным решением для систем автономного и резервного теплоснабжения.

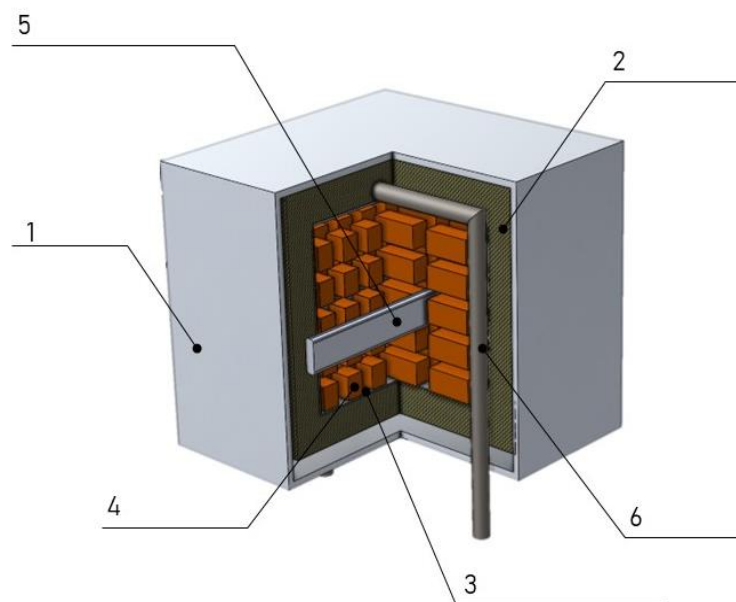


Рисунок 1. Модель теплоаккумулирующей установки: 1 – корпус; 2 – второй изоляционный слой; 3 – первый изоляционный слой; 4 – рабочее аккумулирующее тело; 5 – нагреватели; 6 – теплообменник

Список литературы:

1. Pimm, A.J., Palczewski, J., Barbour, E.R. et. al. Using electricity storage to reduce greenhouse gas emissions. *Applied Energy*. 2021; 282:116199. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116199
2. Mahmoud M., Ramadan M., Naher S. et al. A review of mechanical energy storage systems combined with wind and solar applications // *Energy Conversion and Management*. – 2020. – Vol. 210. – P. 112670.
3. Energy Vault: [официальный сайт]. – URL: <https://www.energyvault.com/> (дата обращения: 30.11.2025).
4. Mahmoud M., Ramadan M., Naher S. et al. A review of mechanical energy storage systems combined with wind and solar applications // *Energy Conversion and Management*. – 2020. – Vol. 210. – P. 11260.
5. Soloveichik G. L. Battery technologies for large-scale stationary energy storage. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*. 2011; 2:503-527. doi: 10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116.
6. Morandi, A., Breschi, M., Ribani, P., et. al. Superconducting magnetic energy storage. *Energy Storage for Power Systems*. 2020. doi: 10.1049/pbpo063e_ch11.
7. AMSC: [официальный сайт]. – URL: <https://www.amsc.com/> (дата обращения: 30.11.2025).
8. Yuan K., Shi, J., Aftab, W., et. al. Engineering the thermal conductivity of functional phase-change materials for heat energy conversion, storage, and utilization. *Advanced Functional Materials*. 2020;30(8):1904228. doi: 10.1002/adfm.201904228.

© Расчислова С. А., Абдуллина А. А., 2025

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

магистрант **Литвинюк Аделина Максимовна**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент **Ляпин Александр Игоревич**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Работа направлена на выявление и оценку путей повышения энергоэффективности атомной энергетики с акцентом на практическое применение. Исследованы термодинамические циклы, используемые и перспективные для АЭС. Проведен анализ эффективности утилизации низкопотенциальной тепловой энергии, сбрасываемой АЭС, с использованием тепловых насосов в целях повышения общей эффективности и снижения воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: атомная энергетика, коэффициент полезного действия, сбросная теплота, тепловой насос, сокращение выбросов.

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF NUCLEAR POWER PLANTS

Master Student **Litvinyuk Adelina Maksimovna**,
Academic Advisor: PhD in Technology, Associate Professor
Lyapin Alexander Igorevich,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The work is aimed at identifying and evaluating ways to improve the energy efficiency of nuclear power with an emphasis on practical applications. Thermodynamic cycles used and promising for nuclear power plants are investigated. The efficiency of utilization of low-potential thermal energy discharged by nuclear power plants using heat pumps has been analyzed in order to increase overall efficiency and reduce environmental impact.

Keywords: nuclear power engineering, efficiency, waste heat, heat pump, reducing emissions.

Повышение энергоэффективности экономики страны является одной из приоритетных задач. Для достижения этой цели в атомной энергетике рассматривают следующие пути:

- повышение установленной мощности действующих энергоблоков путем модернизации оборудования;
- повышение коэффициента полезного действия АЭС путем совершенствования тепловых схем и термодинамических циклов [1];

- повышение коэффициентов использования установленной мощности (КИУМ);
- снижение расходов тепловой и электрической энергии на собственные нужды АЭС;
- снижение непроизводительных расходов и потерь энергии;
- использование низкопотенциальной сбросной тепловой энергии.

Наряду с эволюционным подходом к решению существующих задач особое внимание уделяется изучению инновационных разработок, потенциально способных радикально повысить экологическую безопасность, энергоэффективность и экономическую привлекательность атомной энергетики.

Атомные электростанции производят значительные объемы низкопотенциальной тепловой энергии, температура которой недостаточна для прямого промышленного применения. Однако, благодаря современным технологиям, мировые разработки доказывают возможность повышения температурного уровня этой энергии с помощью тепловых насосов, делая ее пригодной для целей теплоснабжения. В частности, рассматриваются различные модели парокомпрессионных тепловых насосов, обладающих высокими коэффициентами трансформации. Эти насосы позволяют оптимизировать распределение тепловых потоков в паротурбинной установке (ПТУ), улучшить работу сетевых устройств и сократить объем тепловой энергии, сбрасываемой с охлаждающей водой [2].

Для оценки эффективности применения теплового насоса в паротурбинной установке (ПТУ) АЭС был рассмотрен вариант с отбором тепла от охлаждающей воды, циркулирующей на входе или выходе конденсатора турбины [3]. Конденсатор теплового насоса при этом интегрируется в систему регенеративного подогрева, заменяя первый подогреватель низкого давления (ПНД1). Эта схема подключения минимизирует необходимость внесения изменений в конструкцию ПТУ АЭС. Установка испарителя теплового насоса в канал подводящей или отводящей охлаждающей воды упрощает его монтаж.

Подключение испарителя к охлаждающей воде на входе в конденсатор обуславливает увеличение выработки турбины за счет двух факторов [3]:

1. Увеличение расхода пара в последних ступенях турбины из-за замены подогрева конденсата в ПНД1 тепловым насосом (вместо отбора пара).
2. Увеличение используемого теплоперепада на последних ступенях турбины, вызванное снижением давления насыщения в конденсаторе в результате отбора тепла испарителем теплового насоса и, как следствие, снижения температуры охлаждающей воды.

При подключении испарителя к охлаждающей воде на выходе из конденсатора увеличение мощности достигается только за счет первого фактора, однако более высокая температура воды на выходе повышает эффективность работы теплового насоса. В первом случае увеличиваются как дополнительная выработка электроэнергии, так и энергозатраты на работу

теплового насоса. Во втором случае дополнительная выработка будет меньше, но и затраты электроэнергии на компрессор также снизятся [4].

Помимо прочих вариантов, утилизация низкопотенциальной теплоты с помощью тепловых насосов может быть реализована для отопления административных, бытовых и производственных зданий АЭС, а также близлежащего населенного пункта. В настоящее время теплоснабжение осуществляется за счет отбора рабочего пара из турбины, что приводит к уменьшению выработки электроэнергии. Внедрение тепловых насосов с коэффициентом трансформации $K_t = 4$ для целей теплоснабжения позволяет:

- сократить тепловые сбросы в окружающую среду;
- исключить (или минимизировать) отбор пара на нужды теплофикации, увеличивая тем самым выработку электроэнергии.

Повышение энергоэффективности АЭС – это приоритет, достигаемый через модернизацию и инновации. Современные разработки в энергетическом машиностроении позволяют оптимизировать параметры пара на АЭС с ВВЭР без ущерба для эксплуатации твэлов [5]. Использование тепловых насосов в схеме охлаждения конденсатора экономически не оправдано, они пригодны лишь для сокращения тепловых сбросов. Выгоднее утилизировать низкопотенциальное тепло систем охлаждения с помощью тепловых насосов для нужд теплоснабжения. Это увеличивает выработку электроэнергии при тех же затратах и снижает тепловое загрязнение окружающей среды.

Список литературы:

1. Щепетина, Т. Д. О повышении КПД энергоблоков с водо-водяными реакторами (ВВР) / Т. Д. Щепетина // Энергия: экономика, техника, экология. – 2010. – № 12. – С. 21–29.
2. Ефимов, Н. Н. Анализ использования тепловых насосов на тепловых и атомных электростанциях / Н. Н. Ефимов [и др.] // Энергетика и рациональное природопользование. – 2010. – № 4. – С. 15–22.
3. Ташлыков, О. Л. Снижение тепловых нагрузок АЭС на окружающую среду путем использования тепловых насосов в схеме основного конденсатора паротурбинной установки / О. Л. Ташлыков [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 3. – С. 16–21.
4. Машиностроение ядерной техники. В 2 книгах. Книга 1 / Е. О. Адамов, Ю. Г. Драгунов, В. В. Орлов [и др.]; под общей редакцией Е. О. Адамова. – Москва: Машиностроение, 2005. – 960 с. – (Машиностроение. Энциклопедия; т. IV-25).
5. Минеев, П. А. Способы повышения энергетической эффективности оборудования системы регенерации АЭС с реакторами типа ВВЭР / П. А. Минеев, В. А. Горбунов // Научный аспект. – 2024. – Т. 13, № 5. – С. 540–546.

© Литвинюк А. М., 2025

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ КОМФОРТА ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОКЛИМАТОМ ПОМЕЩЕНИЙ

аспирант **Игнатов Евгений Александрович**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент **Гонтовой Сергей Викторович**,
Московский политехнический университет,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. В работе разобран вопрос повышения теплового комфорта пользователей внутри помещений. Предложен способ повышения эффективности управления тепловым комфортом пользователей.

В данном исследовании также отмечено, что сочетание современных сенсоров в совокупности с возможностями нейросетевых технологий и проверенными методами определения теплового комфорта, могут существенным образом повысить комфорт пользователей. Достигнуть это возможно благодаря учёту ряда параметров, недоступных прежним системам климат-контроля.

Ключевые слова: микроклимат помещений, тепловой комфорт, управление микроклиматом, умный дом, автоматическое управление, расчётный модуль.

A METHOD FOR INCREASING USERS COMFORT IN ROOM CLIMATE CONTROL SYSTEMS

PhD Student **Ignatov Evgeny Aleksandrovich**,
Academic Advisor: PhD in Technology, Associate Professor **Gontovoy Sergey
Viktorovich**,
Moscow Polytechnic University,
Moscow, Russian Federation

Abstract. This paper examines the issue of improving indoor user thermal comfort. A method for improving the efficiency of user thermal comfort management is proposed.

This study also notes that the combination of modern sensors, coupled with neural network technologies and proven methods for determining thermal comfort, can significantly improve user comfort. This can be achieved by taking into account a number of parameters inaccessible to previous climate control systems.

Keywords: indoor microclimate, thermal comfort, microclimate control, smart home, automatic control, calculation module.

Введение

Большинство современных систем управления микроклиматом помещений работают по определённым сценариям. Среди таких сценариев

могут быть следующие варианты: включение и выключение системы в определённое время; включение и отключение системы при достижении определённой температуры в помещении и т. д. Несмотря на то, что такие системы функционируют в автоматическом или автоматизированном режиме по схеме управления с обратной связью, их нельзя считать эффективно работающими на достижение теплового комфорта пользователей. Связано это с тем, что целью работы подобных систем является регулирование определённого параметра, как правило, температуры помещения, режима температуры и влажности. Работа таких систем часто вызывает неудовлетворённость в предпочтениях пользователей, что наглядно проиллюстрировано экспериментальными исследованиями, приведёнными в работе [1, с. 7-8]. При работе подобных систем не учитываются рекомендации, изложенные в стандарте [2, с. 6-7]. Кроме того, эти системы могут продолжать работать на достижение регулируемого параметра, даже в отсутствии пользователей, что приводит к перерасходу энергии. Для решения обозначенной проблемы необходимо регулировать не один или два отдельных климатических параметра, а весь комплекс исходных параметров теплового комфорта. Соответственно, целью данного проекта является разработка программно-аппаратного комплекса для управления тепловым комфортом пользователей, находящихся в помещении. Для реализации указанной цели, потребуется решить следующие задачи:

1. Провести анализ предметной области;
2. Разработать метод и систему управления тепловым комфортом пользователей, находящихся внутри помещения;
3. Разработать программную часть системы управления тепловым комфортом пользователей, находящихся внутри помещения;
4. Разработать аппаратную часть системы управления тепловым комфортом пользователей, находящихся внутри помещения.

Основная часть

Известна и широко применяется на практике методика для расчёта теплового комфорта человека, представленная в стандартах [3, 4]. Соответственно, для повышения эффективности систем управления необходимо учитывать данную методику. В качестве исходных данных для расчёта теплового комфорта в этой методике используются следующие параметры: температура воздуха в помещении, ($^{\circ}\text{C}$); средняя радиационная температура в помещении, ($^{\circ}\text{C}$); скорость движения воздуха в помещении, (м/с); относительная влажность воздуха, %; метаболизм пользователей, расположенных в помещении, (Вт/м^2); теплоизоляция одежды пользователей, расположенных в помещении, (clo).

Для повышения комфорта пользователей, в данном проекте, предложена схема управления микроклиматом помещений (рис. 1).

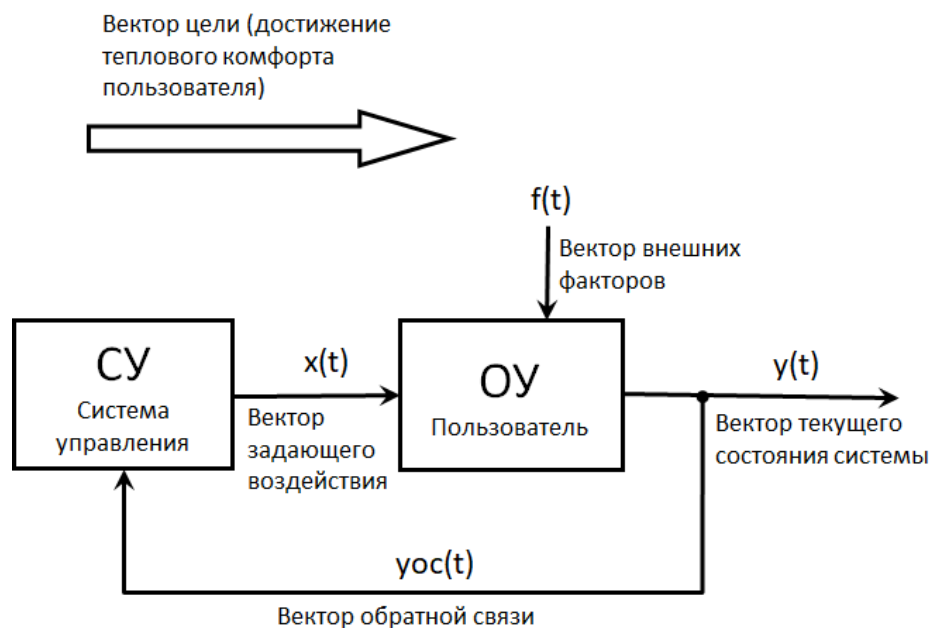


Рисунок 1. Система управления тепловым комфортом пользователей, расположенных внутри помещения

Система, приведённая на рисунке 1, функционирует следующим образом: в качестве субъекта управления (СУ) выступает программная и аппаратная части системы управления «умного дома». В качестве объекта управления (ОУ) выступают ощущения теплового комфорта пользователей.

В данном проекте предложена система, вектором цели которой является достижение и поддержание теплового комфорта пользователей в необходимых диапазонах. Целью же работы большинства систем-аналогов, например, приведенных в патентах [5, 6], является поддержание лишь одного или двух параметров теплового комфорта в заданных диапазонах.

С СУ на ОУ поступает вектор задающего воздействия в виде корректировки или рекомендации к корректировке 6 исходных параметров, влияющих на изменение комплексного параметра теплового комфорта PMV [3, с. 6].

На ОУ также оказывает значение вектор внешних факторов. В вектор внешних факторов могут входить, например, такие параметры, как температура и влажность на улице, сквозняки и т. д.

При каждом цикле работы системы с выхода снимается вектор текущего состояния системы и вектор обратной связи (цифровые значения теплового комфорта PMV и цифровые значения каждого из 6 исходных параметра).

Цикл работы актуаторов повторяется до достижения системой приемлемого значения PMV. Если приемлемое значение PMV достигнуто, система переходит в «спящий режим», при котором сенсоры проверяют состояние системы лишь раз в несколько минут.

На первом цикле работы системы контроллер производит запрос данных с сенсоров и видеокамеры. С помощью аппаратной части сенсоров определяются 4 исходных параметра: температура воздуха в помещении, ($^{\circ}\text{C}$); средняя радиационная температура в помещении, ($^{\circ}\text{C}$); скорость движения

воздуха в помещении, (м/с); относительная влажность воздуха, %. Все эти данные от сенсоров, посредством mesh-сети, передаются на контроллер, являющийся приёмо-передающим устройством. Данные, снимаемые посредством фото- или видеокамеры, также поступают на контроллер. Далее контроллер передаёт все эти данные на сервер. На сервере размещена программная часть системы. Попав на сервер, данные с контроллера сохраняются в модуле баз данных (далее БД). Фото или видеоданные поступают на обработку в модуль искусственной нейронной сети (далее ИНС). В качестве ИНС, в данном проекте применяется YOLO 11 версии. С помощью ИНС система производит цифровую обработку данных, поступивших с фото или видеокамеры. Цифровая обработка данных с помощью ИНС необходима для определения 2 параметров: метаболизма пользователей, расположенных в помещении, (Вт/м^2) и теплоизоляция одежды пользователей, расположенных в помещении, (clo). Метаболизм определяется благодаря его классификации в зависимости от вида осуществляемых действий. Данная классификация осуществляется по методике, изложенной в стандарте [7, с. 16]. В данном стандарте виды деятельности человека разбиты на группы, каждой из которых соответствует цифровое значение метаболизма. ИНС, осуществляя обработку фото- или видео материала, полученного с камеры, определяет, к какому типу действия относится деятельность человека. Далее, на основании таблицы соответствия, осуществляется присвоение цифрового значения метаболизма. Определение коэффициента теплоизоляции одежды осуществляется по методике, изложенной в приложении С2 стандарта [3, с. 20]. В данном стандарте виды одежды человека также разбиты на группы, каждой из которых соответствует цифровое значение коэффициента теплоизоляции одежды. Процедура определения коэффициента теплоизоляции одежды аналогична процедуре определения метаболизма, описанной выше. Значение каждого посчитанного параметра сохраняется в модуль БД.

После выявления всех 6 исходных параметров, необходимых для расчёта теплового комфорта, все эти исходные параметры поступают в расчётный модуль. После осуществления процедуры расчёта посчитанные значения передаются на модуль оптимизации. В модуле оптимизации, в зависимости от цифрового значения теплового комфорта, определяется оптимальный вариант теплового актуатора, который следует активировать. После этого данные об оптимальном варианте теплового актуатора передаются с сервера на контроллер. Контроллер, в свою очередь, осуществляет активацию необходимого актуатора. Цикл работы системы повторяется до тех пор, пока показатель теплового комфорта пользователей не достигнет приемлемых пределов.

Структура системы управления тепловым комфортом пользователей «умного дома» представлена на рисунке 2.

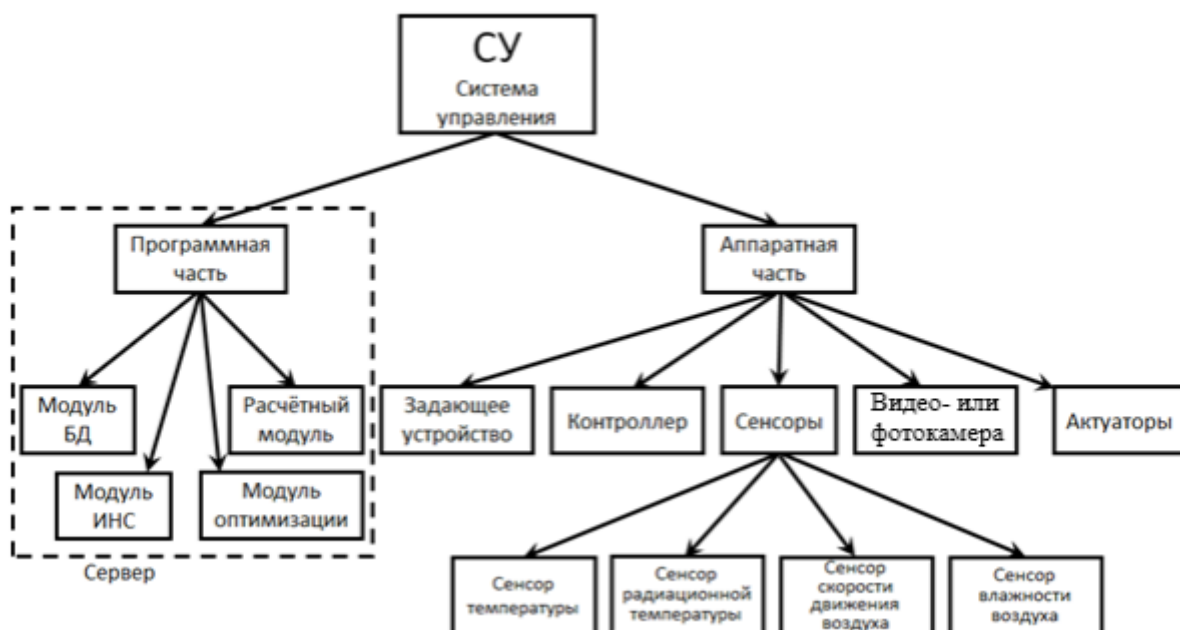


Рисунок 2. Структура системы управления тепловым комфортом пользователей

Таким образом, определение теплового комфорта можно представить в виде последовательности шагов, приведённой на рисунке 3.



Рисунок 3. Последовательность определения теплового комфорта пользователей

Выводы

Проведенный в работе анализ показал, что микроклимат внутри помещений оказывает значительное влияние на качество жизни людей, находящихся в них.

В работе описаны способ и система управления микроклиматом помещений, способные повысить удовлетворенность пользователей тепловым комфортом.

Для расчета теплового комфорта предложена стандартизированная и хорошо зарекомендовавшая себя методика. Программная и аппаратная части системы полностью адаптированы под данную методику, что повышает надежность работы системы.

В рамках данного проекта ведутся работы по проектированию как программной, так и аппаратной частей описанной системы.

Список литературы:

1. Свирин, М. В. Исследование влияния ненормативной внутренней температуры помещения на тепловой комфорт в переходный период с использованием индексов PMV и PPD / М. В. Свирин // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2022. – № 3(22). – С. 28-38. – EDN OCGIRM.
2. ГОСТ 30494 -2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – М.: Стандартинформ, 2013.
3. ГОСТ Р ИСО 7730 -2009. Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта. – М.: Стандартинформ, 2011.
4. ISO 7730: 2005. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (IDT): INTERNATIONAL STANDARD: Third edition 2005-11-23 / TC 159/SC 5. – Switzerland: TC 159/SC 5, 2005.
5. XU TIAN, XU CHANGNA, CHENG CHANG и соавт. Indoor thermal environment adjusting system based on body feeling of human body. Пат. 108458441 Китай; заявитель и патентообладатель HUIBAO INTELLIGENT TECH SHANGHAI CO LTD. – № 201810107353; заявл. 02.02.18; опубл. 28.08.18.
6. XIA HONGXING, DONG CHAO, XIA HONGXING и соавт. Appropriate-temperature and appropriate-humidity environment control system based on human body thermal comfort mechanis. Пат. 109682043 Китай; заявитель и правообладатель MCC REAL ESTATE GROUP CO LTD. – № 201811626510; заявл. 28.12.18; опубл. 26.04.19.
7. ГОСТ Р ИСО 8996–2008. Эргономика термальной среды. Определение скорости обмена веществ. – М.: Стандартинформ, 2009.

© Игнатов Е. А., 2025

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА КСВА 1800-170 КОНДЕНСАТОРНОЙ
УСТАНОВКИ НА ЭНЕРГОБЛОКЕ № 1, 2 АЭС «РУППУР»**

студент **Иванова Екатерина Ильинична**,
науч. руководитель: аспирант, ассистент **Иванов Олег Олегович**,
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна, Высшая школа технологий и энергетики,
Санкт-Петербург, Российский Федерация

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы модернизации системы управления электроприводом конденсатного насоса КсВА 1800-170, эксплуатируемого на энергоблоках № 1 и № 2 АЭС «Руппур». Приведено описание технологического объекта и его характеристик. Проведен анализ недостатков существующего способа регулирования производительности методом дросселирования. Предложено техническое решение по внедрению системы частотного регулирования (ЧРП) высоковольтного электродвигателя, разработана функциональная схема конденсатно-питательного тракта. Обоснована энергетическая и эксплуатационная эффективность предлагаемого решения.

Ключевые слова: АЭС «Руппур», конденсатный насос КсВА 1800-170, частотно-регулируемый электропривод, энергоэффективность, система автоматического управления, функциональная схема.

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE CONTROL SYSTEM FOR THE
ELECTRIC DRIVE OF THE KsVa 1800-170 PUMP IN THE CAPACITOR
UNIT AT POWER UNIT № 1, 2 OF THE RUPPUR NPP**

Student **Ivanova Ekaterina Ilyinichna**,
Academic Advisor: Postgraduate Student, Assistant **Ivanov Oleg Oleg Olegovich**,
Saint Petersburg State Technical University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Power Engineering,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. This article examines the modernization of the control system for the electric drive of the KsVA 1800-170 condensate pump, which operates at Units 1 and 2 of the Rooppur NPP. A description of the process facility and its characteristics is provided. A shortcoming of the existing throttling method for capacity control are analyzed. A technical solution for implementing a frequency-controlled system (VDC) for the high-voltage electric motor is proposed, and a functional diagram of the automatic control system is developed. The energy and operational efficiency of the proposed solution is substantiated.

Keywords: Rooppur NPP, condensate pump KcVA 1800-170, variable frequency drive, energy efficiency, automatic control system, functional diagram.

Введение. Строительство АЭС «Руппур» является важнейшим международным энергетическим проектом [1], реализуемым по российскому дизайну с реакторами ВВЭР-1200. Надежность и эффективность работы вспомогательного оборудования турбинного отделения, к которому относятся конденсатные насосы, напрямую влияют на технико-экономические показатели энергоблока в целом. В условиях современных требований к маневренности и энергосбережению, применение традиционных методов регулирования производительности насосных агрегатов становится неэффективным, что обуславливает актуальность разработки современных систем управления на базе частотно-регулируемого привода (ЧРП) [2-3].

Описание технологического объекта и насосного агрегата. Объектом исследования является электронасосный агрегат КсВА 1800-170, предназначенный для подачи конденсата второго контура из конденсатора турбины в подогреватели низкого давления (ПНД) через систему очистки. Агрегат эксплуатируется в постоянном режиме на энергоблоках №1 и №2 АЭС «Руппур».

В состав агрегата входит вертикальный двухкорпусной секционный насос КсВА 1800-170. Основные технические характеристики насоса в номинальном режиме приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики насоса КсВА 1800-170

Параметр	Значение
Подача номинальная	1765 м³/ч (0,490 м³/с)
Напор	163 м
Частота вращения	1490 об/мин (24,83 с⁻¹)
Потребляемая мощность насоса	971 кВт
КПД насоса	80%
Кавитационный запас (NPSH)	3,8 м

На рисунке 1 проиллюстрируем внешний вид насоса и его расходно-напорную характеристику с КПД, требуемым кавитационным запасом, характеристикой сети, мощностью.

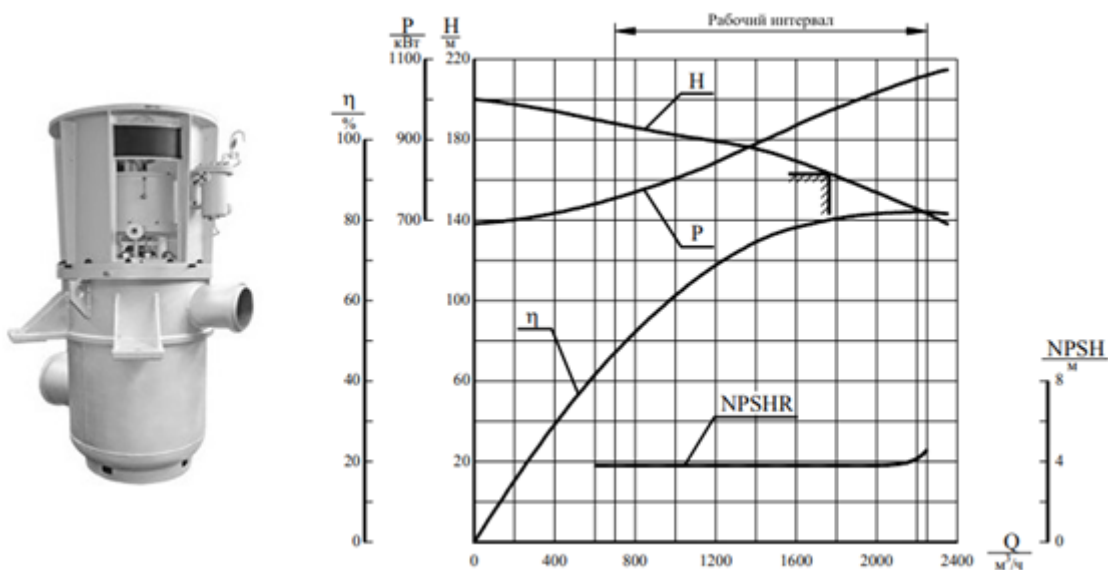


Рисунок 1. Внешний вид насоса (слева) и его расходно-напорная характеристика (справа)

Приводом насоса служит трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором мощностью 1250 кВт и номинальным напряжением 10 кВ. Двигатель имеет исполнение по монтажу IM3011 и степень защиты IP54/IP55. Охлаждение двигателя – водяное, с замкнутой системой вентиляции.

Анализ существующей системы и постановка задачи

В базовом варианте управление производительностью насоса осуществляется путем дросселирования напорной линии с помощью регулирующей арматуры. При снижении потребления конденсата (например, при разгрузке энергоблока) задвижка прикрывается, увеличивая гидравлическое сопротивление сети. Это приводит к смещению рабочей точки насоса влево по характеристике $Q - H$, вызывая рост напора выше требуемого и значительные потери энергии на клапане.

Кроме того, пуск двигателя осуществляется прямым включением в сеть, что вызывает пусковые токи, в 6–7 раз превышающие номинальные, и создает значительные динамические нагрузки на механическую часть насоса и гидравлическую сеть (гидроудары). Работа на закрытую задвижку и частые пуски снижают ресурс оборудования.

Разработка системы частотного регулирования

Для устранения указанных недостатков предлагается внедрение системы частотного регулирования электропривода насоса. Использование высоковольтного преобразователя частоты (ВПЧ) позволяет плавно изменять частоту вращения вала электродвигателя в зависимости от требуемого расхода конденсата.

Применение частотного регулирования для насоса КсВА 1800-170 основано на фундаментальном законе механики жидкости и газа. Согласно законам подобия для центробежных лопастных машин, потребляемая мощность P зависит от частоты вращения n в кубической зависимости [2]-[7]:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3.$$

Подача насоса пропорциональна скорости вращения:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Напор пропорционален квадрату скорости вращения:

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2.$$

Это означает, что небольшое снижение скорости вращения при неполной нагрузке приводит к существенной экономии электроэнергии. Например, если снизить частоту вращения на 20 % (с 1490 об/мин до 1192 об/мин), энергопотребление уменьшится на:

$$1 - (0.8)^3 = 1 - 0.512 = 0.488 \text{ или примерно } 49 \%.$$

При снижении на 30 %:

$$1 - (0.7)^3 = 1 - 0.343 = 0.657 \text{ или примерно } 66 \%.$$

Для оценки годовой экономии электроэнергии при внедрении частотного регулирования используется следующая формула:

$$\Delta W = P_{\text{ном}} \times T \times \left[1 - k_{\text{загр}} \times \left(\frac{n_{\text{сред}}}{n_{\text{ном}}} \right)^3 \right],$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность насоса (кВт) = 971 кВт - T – время работы в год (ч) ≈ 8000 – 8500 ч, $k_{\text{загр}}$ – коэффициент загрузки при дросселировании $\approx 0,8$ - $n_{\text{сред}}/n_{\text{ном}}$ – отношение средней частоты вращения к номинальной $\approx 0,75$.

Подставляя значения:

$$\Delta W = 971 \times 8000 \times [1 - 0.8 \times (0.75)^3]$$

$$\Delta W = 7,768,000 \times [1 - 0.8 \times 0.422]$$

$$\Delta W = 7,768,000 \times [1 - 0.338]$$

$$\Delta W = 7,768,000 \times 0.662 \approx 5,140,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$$

При средней стоимости электроэнергии для АЭС 2–3 руб/кВт·ч годовая экономия составит:

$$\text{Экономия} = 5,140,000 \times 2.5 = 12,850,000 \text{ руб/год}$$

Срок окупаемости высоковольтного преобразователя частоты (стоимость 15–20 млн руб) составит 1,2–1,5 года. Напорная характеристика должна быть стабильной в рабочем диапазоне подач, при увеличении подачи напор должен постоянно снижаться. Максимальный напор достигается при нулевой подаче.

Насос должен обеспечивать длительную эксплуатацию в рабочем интервале подач от 0,194 до 0,625 м³/с (от 700 до 2250 м³ /ч).

Агрегат при нормальных условиях эксплуатации должен обеспечивать заданные характеристики (подачу и напор) в рабочем интервале при частоте сети в диапазоне от 49,0 Гц до 50,5 Гц, с учетом их изменений за счет отклонений частоты сети от номинальной (50 Гц).

Агрегаты должны быть рассчитаны на параллельную работу.

Функциональная схема. Авторами работы была создана функциональная схема на рисунке 2, показывающая основные узлы конденсатно-питательного тракта АЭС.

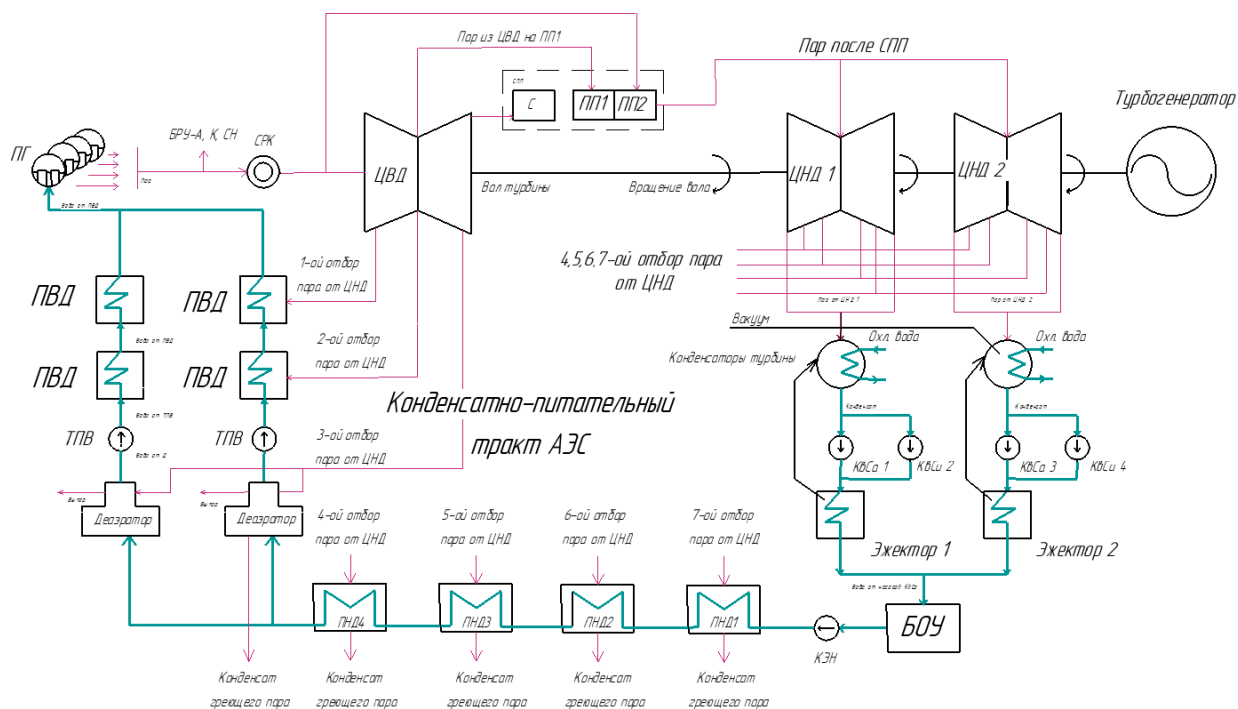


Рисунок 2. Функциональная схема конденсатно-питательного тракта АЭС

Согласно функциональной схеме, агрегат насосный АКсВА 1800-170 (рисунок 1) предназначен для подачи конденсата второго контура из конденсатора в подогреватель низкого давления (ПНД-2) через конденсатор пара уплотнений (КПУ), блочную обессоливающую установку (БОУ) и подогреватель низкого давления (ПНД-1) энергоблоков №1, 2 АЭС «Руппур». При откачивании малых расходов (менее 700 м³/ч) основного конденсата агрегат должен работать с рециркуляцией.

Ранее в «старой» системе уровень в конденсатосборнике измеряется дифманометром, сигнал от которого поступал на регулятор, где сравнивается с сигналом задания.

На регулятор уровня конденсата (РУК) получает сигнал по уровню конденсата в конденсатосборнике и воздействует на регулирующий клапан, изменяющий расход конденсата за питательным насосом.

РУК активно воздействует на регулирующий клапан рециркуляции, обеспечивая требуемый пропуск воды в системе охлаждения паровых эжекторов и поддерживая уровень воды в конденсатосборнике. Регулирование уровня воды в конденсаторе осуществляется с помощью трехходового клапана и линии рециркуляции, по которой часть конденсата сбрасывается обратно в конденсатор.

Единственным регулирующим воздействием при стабилизации уровня может быть изменение производительности конденсатных насосов с помощью регулирующего клапана, установленного за напорным трубопроводом от

конденсатного насоса с учетом расходов пара через турбину и охлаждающей воды.

Авторами предлагается использовать частотное регулирование в новой схеме. Функциональная схема системы управления электроприводом насоса КсВА 1800-170 будет разработана в следующих работах и должна включать в себя следующие уровни:

1. Уровень КИПиА (Полевой уровень):
 - датчик уровня конденсата в конденсатосборнике (основной регулируемый параметр);
 - датчики давления на входе и выходе насоса;
 - датчики температуры подшипников и обмоток двигателя (для защит);
 - датчики вибрации на корпусе насоса и двигателя.
2. Уровень управления (Контроллерный уровень):
 - программируемый логический контроллер (ПЛК), реализующий алгоритмы ПИД-регулирования. Контроллер получает сигнал от датчика уровня, сравнивает его с уставкой и формирует сигнал задания скорости для ВПЧ;
 - схема защит и блокировок, реализованная программно и аппаратно (логика «2 из 3» для критических параметров);
3. Силовой уровень:
 - высоковольтный преобразователь частоты (топология на базе ячеек с IGBT-транзисторами), обеспечивающий формирование напряжения 10 кВ с регулируемой частотой;
 - асинхронный двигатель 1250 кВт.

Принцип работы схемы: ПЛК поддерживает заданный уровень конденсата в конденсатосборнике, изменяя производительность насоса через ВПЧ. Если уровень падает ниже уставки, частота вращения снижается, уменьшая отбор конденсата. При повышении уровня частота плавно увеличивается. Это исключает необходимость дросселирования напорной задвижки, которая в данном режиме остается полностью открытой.

Предпусковые условия (Разрешающие условия):

Перед подачей команды на запуск ПЛК проверяет выполнение следующих условий:

1. Давление конденсата на входе в насос обеспечивает требуемый надкавитационный напор $NPSHR = 3,8$ м (минимальное давление на входе $\geq 0,04$ МПа).
2. Задвижка на входе в насос открыта полностью.
3. Линия рециркуляции открыта (для предотвращения работы на закрытую задвижку).
4. Обеспечена подача охлаждающей воды на опорные подшипники, уплотнение и воздухоохладитель (давление 0,60–0,80 МПа, температура 13–37 °С).
5. Все параметры защиты находятся в норме.
6. Электродвигатель готов к запуску (контакты управления замкнуты, наличие напряжения 10 кВ).

Условия отключения насоса:

- температура подшипников превышает 95 °С;
- температура обмоток электродвигателя превышает 155 °С;
- давление конденсата на входе ниже 0,02 МПа (риск кавитации);
- виброскорость на корпусе превышает 7,1 мм/с;
- обнаружена утечка воды из воздухоохладителя;
- перепад давления на фильтре превышает допустимое значение.

Предупредительная сигнализация при:

- приближении температурных параметров к предельным значениям;
- повышении виброскорости выше 5,0 мм/с;
- снижении давления на входе ниже 0,05 МПа;
- повышении давления на выходе выше 2,5 МПа.

Исследование эффективности и надежности

Применение частотного регулирования для насоса КсВА 1800-170 на АЭС «Руппур» обеспечивает следующие преимущества:

Энергосбережение: исключение потерь на дросселирование и работа двигателя с оптимальным КПД в широком диапазоне нагрузок [9].

Увеличение ресурса: плавный пуск двигателя исключает пусковые токи и механические удары, продлевая срок службы изоляции обмоток и подшипниковых узлов [10].

Стабильность техпроцесса: высокая точность поддержания уровня конденсата повышает надежность работы всей конденсатно-питательной системы.

Снижение кавитационного износа: при работе на пониженных оборотах увеличивается допустимый кавитационный запас, что снижает риск кавитации рабочего колеса первой ступени.

Заключение

Разработанная система управления электроприводом насоса КсВА 1800-170 с применением частотного регулирования является эффективным решением для энергоблоков № 1 и № 2 АЭС «Руппур». Внедрение данной системы позволяет не только снизить потребление электроэнергии на собственные нужды станции, но и существенно повысить надежность и безопасность эксплуатации насосного оборудования, что является приоритетом для объектов атомной энергетики.

Список литературы:

1. АО «Атомпроект». Общая информация о деятельности. [Электронный ресурс]. URL: <https://ase-ec.ru/sustainability/integrated-management-system/ao-atomenergoproekt/> (дата обращения: 28.11.2025).
2. Хрусталеv, В. А. Вопросы эффективности высоковольтных частотно-регулируемых приводов главных циркуляционных насосов энергоблока АЭС // Надежность и безопасность энергетики. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 45–52.
3. Группа ГМС. Насосное оборудование для атомной энергетики: Каталог. – М.: Группа ГМС, 2020. – С. 24–28.

4. Козлов, А. Эффективность применения частотно-регулируемого электропривода в насосных установках // Современные технологии автоматизации. – 2005. – № 2. – С. 68–74.
5. Лазарев, Г. Б. Высоковольтный частотно-регулируемый электропривод для механизмов собственных нужд электростанций // Электротехника. – 2004. – № 11. – С. 22–28.
6. Ильинский, Н. Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учебное пособие для вузов / Н. Ф. Ильинский, В. В. Москаленко. – Москва: Академия, 2008. – 208 с.
7. НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. – М.: Ростехнадзор, 2015.
8. Ледуховский, Г. В. Анализ эффективности регулирования питательных насосов изменением частоты вращения // Вестник ИГЭУ. – 2021. – № 2. – С. 12–18.
9. Park J. H. Study on the VFD (Variable Frequency Drive) for Condensate Pump in Nuclear Power Plant // Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting. – Pyeongchang, 2014. – P. 188–189.
10. Онищенко, Г. Б. Электрический привод. – М.: РАСХН, 2003. – 320 с.

© Иванова Е. И., 2025

МАТЕРИАЛЫ
V Всероссийской научно-практической
конференции обучающихся и преподавателей
«ЭНЕРГЕТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ:
ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ»

2026

Редактор и корректор Е. О. Тарновская
Технический редактор Д. А. Романова

Научное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:
электронное устройство с программным обеспечением
для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 05.02.2026. Изд. № 5237/25

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4