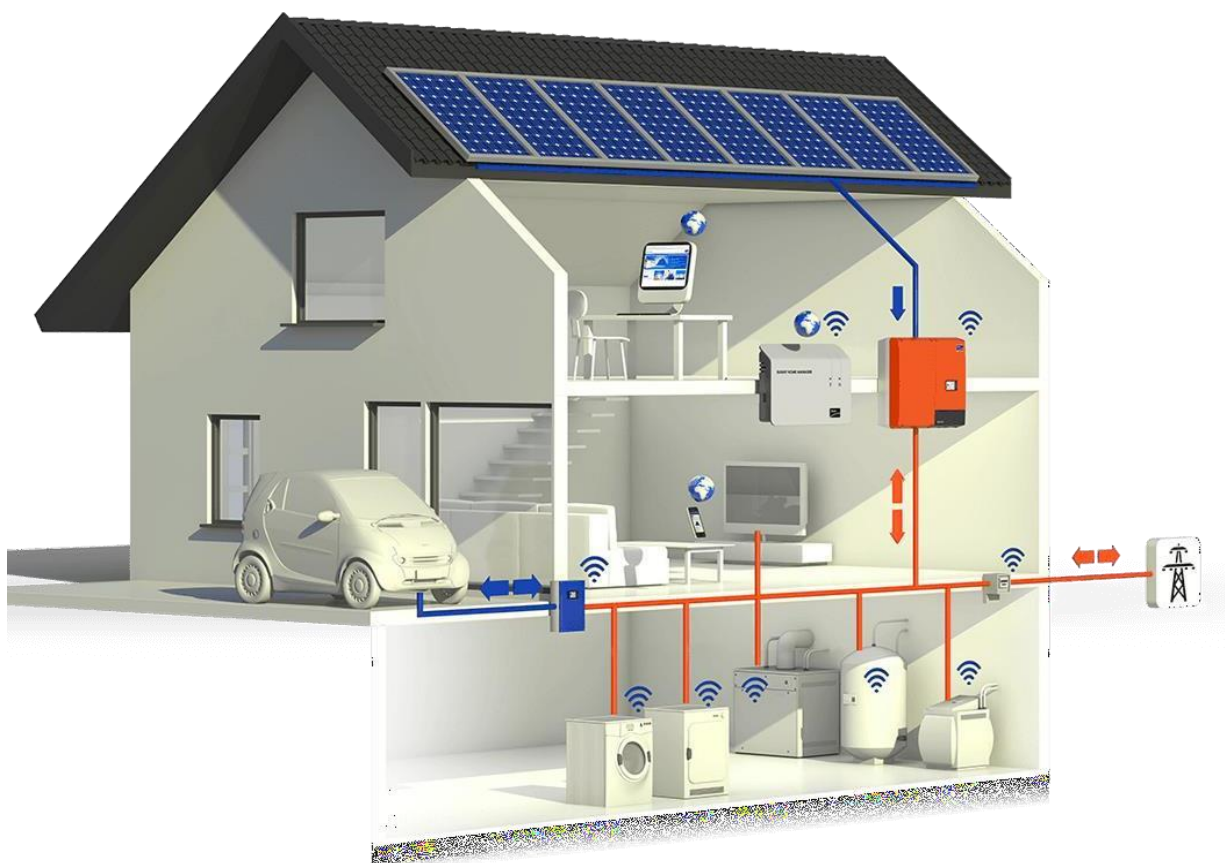


ЭНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ В СОВРЕМЕННОМ ОБЩЕСТВЕ

МАТЕРИАЛЫ

**IX Всероссийской научно-практической
конференции обучающихся и преподавателей**

Научное издание



**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

**IX Всероссийской научно-практической
конференции обучающихся и преподавателей**

**«ЭНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ
В СОВРЕМЕННОМ ОБЩЕСТВЕ»**

6 мая 2026 г.

Научное издание
2026

*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 IX Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей «Энергетика и автоматизация в современном обществе» / 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. — 268 с.

ISBN 978-5-91646-485-6

В настоящем сборнике представлены материалы IX Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей «Энергетика и автоматизация в современном обществе», состоявшейся 6 мая 2026 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 ответственности 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 978-5-91646-485-6

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2026

© Коллектив авторов, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Загидуллина А. Н., Чадаев А. Н., науч. рук. Дмитриев А. В., Биккулов Р. Я. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПО ТЕМПЕРАТУРНОМУ ПРОФИЛЮ В СЛОЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ	7
Никешин В. Г., науч. рук. Сидельников В. И. КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПРОЦЕССА СУЛЬФАТНОЙ ВАРКИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПОДХОДА.....	13
Алтамирано Салмерон Куаутемок Бернардович, Нуждин И. Д., науч. рук. Сысоева О. В. РОЛЬ ОСОБЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗОН В РАЗВИТИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ	18
Рачкин А. И., науч. рук. Мишин А. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ РАССИНХРОНИЗАЦИИ ДАННЫХ ДАТЧИКОВ В РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ	24
Никулина Е. М., Галимуллина И. И., науч. рук. Хуснутдинов Р. Р. СПЕКТР ВОЗМОЖНОСТЕЙ: СРАВНЕНИЕ РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ И БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ	33
Клопов И. В., науч. рук. Котов В. В. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ КЛАССИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПО ДАННЫМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	38
Гаркуша Н. В. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗА ПОСЛЕ ДКС В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ.....	45
Высотина Е. Р., Прокудина Е. А., науч. рук. Сысоева О. В. ВЛИЯНИЕ БЛОКИРОВКИ ОРМУЗСКОГО ПРОЛИВА НА ПЕРЕБОЙ В ГЛОБАЛЬНЫХ ЦЕПОЧКАХ ПОСТАВОК.....	52
Каштелян Г. Д., науч. рук. Никешин В. Г. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ДИСПЕТЧЕРСКИХ ЦЕНТРАХ: АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ.....	57

Орлов С. А., Никифоров Д. К. СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РОТАЦИОННЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ (RDE)	62
Перепелкина Г., науч. рук. Уланова А. В. ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИИ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	67
Васбиев А. Д., Волостнов В. В., науч. рук. Бадретдинова Г. Р. ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДИКТИВНОГО АНАЛИЗА	76
Минькина А. К., науч. рук. Потапов А. А. РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО ПРЕДИКТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМИ РЕЖИМАМИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ	81
Жабров Е. Д., науч. рук. Качан С. А. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛЕЙ ЗА СЧЁТ ГЛУБОКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ	85
Диже А. А. науч. рук. Никешин В. Г. ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	90
Шепелев А. М., науч. рук. Мишин А. В. ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ РОЕМ РОБОТОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СКЛАДСКИХ КОМПЛЕКСАХ	97
Гладышев Н. Н., Антошкин И. И. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ И ОТОПИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ	106
Храмцова О. С., Куликов Н. С. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ МЕТОДОВ АППРОКСИМАЦИИ L_2 , L_1 И L_∞ К АНОМАЛЬНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ В ЗАДАЧАХ РОБОТОТЕХНИКИ.....	109
Силла Амаду, науч. рук. Бусыгин К. Н. МЕТОД ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ МАШИН НА ОСНОВЕ ВИБРАЦИОННОГО АНАЛИЗА И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ: ОБЗОР И СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ	116
Шарафутдинова Д. Ш., науч. рук. Федотов Е. А. ПЕРСПЕКТИВЫ И БАРЬЕРЫ ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ПОДСТАНЦИЯХ	127

Верхоланцев Д. В., науч. рук. Мишин А. В. САМООБУЧЕНИЕ ДЛЯ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ АВТОНОМНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ	133
Казачкина А. А., Китаева Р. Р., науч. рук. Черкасов А. С. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ, ВОЗНИКАЮЩИХ ВСЛЕДСТВИЕ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ РОТОРА	142
Карпов Р. А., науч. рук. Рахимова Г. С. ИИ-АГЕНТЫ КАК ДИСПЕТЧЕРЫ: АВТОНОМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ БЕЗ УЧАСТИЯ ЧЕЛОВЕКА.....	148
Кравчук А. А., науч. рук. Доманов В. И. УСТРОЙСТВА КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ КАК АЛЬТЕРНАТИВА СИСТЕМАМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВВОДА РЕЗЕРВА..	153
Садикова А. А., Ахунова Г. И., науч. рук. Черкасов А. С. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ РАБОТЫ ПАРОВЫХ ТУРБИН	159
Паршин Н. А., Финапетов М. И., науч. рук. Краснова Н. П. ПРОБЛЕМА СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ ...	165
Злобин В. Г. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ	170
Бобров Д. А., науч. рук. Каширин И. С. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗИФИКАЦИИ ЧАСТНОГО ДОМА: КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ	176
Щетинская О. Н. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РЕКТИФИКАЦИЕЙ ИЗОБУТАН-ИЗОБУТИЛЕНОВОЙ ФРАКЦИИ.....	181
Борткевич О. А., Пеленко В. В., ВЫБОР ОПОР НА СПИНКЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО КОМПЕНСАТОРА ТРУБОПРОВОДА	186
Гришкевич М. М., Зенкина Д. М., науч. рук. Романов Г. Р. ОПТИМИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ВОДОРОДА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ: ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ....	192

Гиматдинов И. С. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КЛЮЧЕВЫЕ ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ АТОМНО- ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ.....	202
Ларионова К. В., науч. рук. Трегубова Н. Д. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ РОБОТИЗАЦИИ РЕГИОНА	208
Романова А. А., науч. рук. Макарова Л. А. МЕЖДУНАРОДНЫЕ НЕФТЕГАЗОВЫЕ ОТНОШЕНИЯ: ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЧЕРЕЗ ДИПЛОМАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ГАРМОНИЗАЦИИ СТАНДАРТОВ	214
Муравьев Г. Г., науч. рук. Белов М. П. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ	225
Моргоев И. Д., науч. рук. Дзгоев А. Э. ИНТЕРПРЕТИРУЕМОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ НЕУЧТЁННОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ГРАДИЕНТНОГО БУСТИНГА И ЗНАЧЕНИЙ ШЕПЛИ	229
Хлыновский А. М. АВТОНОМНЫЙ КОМПЛЕКС СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ВОДНОГО ОКИСЛЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОТХОДОВ.....	234
Ломоносов М. Д., науч. рук. Благодарный Н. С. РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ХРАНЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ПРОИЗВОДСТВА ЭТИЛЕНА	239
Сидельников В. И. ЭВОЛЮЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ.....	245
Гладышев Н. Н., Антошкин И. И. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАПОРА НА ТЕПЛООБМЕН В ОТОПИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗКАХ	251
Гришкевич М. М., Зенкина Д. М., науч. рук. Романов Г. Р. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ	256
Ivanov D. M., Remizova I. V. MODERN AGRICULTURAL COMPLEX: AN INNOVATIVE APPROACH USING SMART HOME TECHNOLOGIES AND THE INTERNET OF THINGS.....	263

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПО ТЕМПЕРАТУРНОМУ ПРОФИЛЮ В СЛОЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

студент **Загидуллина Амина Наилевна**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

аспирант **Чадаев Алексей Николаевич**,
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Российская Федерация

науч. руководители: проф., доктор техн. наук **Дмитриев Андрей Владимирович**,
канд. техн. наук **Биккулов Рустем Ядкарович**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В работе предложен метод решения обратной задачи теплопроводности для плоского слоя теплоизоляции с температурно-зависимым коэффициентом теплопроводности. Алгоритм, используя данные измерений температуры внутри слоя (вблизи холодной границы), восстанавливает коэффициенты полиномиальной зависимости теплопроводности от температуры и температуру на горячей границе. Задача сводится к одномерной оптимизации по неизвестной температуре горячей границы и решению линейной подзадачи методом SVD. Для глобальной сходимости применяется мултистарт с методом Брента на 100 сегментах. Корректность подтверждена сравнением с эталонными решениями.

Ключевые слова: теплопроводность, обратная задача, нелинейная зависимость, метод сингулярного разложения, метод Брента, верификация.

ALGORITHM FOR DETERMINING THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENTS FROM THE TEMPERATURE PROFILE IN A HIGH- TEMPERATURE INSULATION LAYER

Student **Zagidullina Amina Nailevna**,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Postgraduate Student **Chadaev Alexey Nikolaevich**,
Kazan National Research Technological University,
Kazan, Russian Federation

Academic Advisors: Professor, Doctor of Technical Sciences
Dmitriev Andrey Vladimirovich,
PhD in Technical Sciences **Bikkulov Rustem Yadkarovich**,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The paper proposes a method for solving the inverse problem of thermal conductivity for a flat layer of thermal insulation with a temperature-dependent coefficient of thermal conductivity. The algorithm, using the temperature measurement data inside the layer (near the cold boundary), restores the coefficients of the polynomial dependence of thermal conductivity on temperature and the temperature at the hot boundary. The problem is reduced to one-dimensional optimization for an unknown hot boundary temperature and solving a linear subtask using the SVD method. For global convergence, a multistart with the Brent method on 100 segments is used. The correctness is confirmed by comparison with reference solutions.

Keywords: thermal conductivity, inverse problem, nonlinear dependence, singular value decomposition, Brent's method, verification.

Снижение энергоемкости производства и повышение надежности технологического оборудования остаются ключевыми направлениями развития современной промышленности. Для агрегатов, функционирующих в условиях высоких температур, критическим фактором является качество тепловой изоляции, определяющее уровень потерь энергии и температурное состояние несущих элементов. Любые неточности в прогнозировании тепловых режимов могут повлечь за собой как экономические убытки, так и риски аварийных ситуаций. Разработка и эксплуатация современных высокотемпературных промышленных установок требуют точного знания теплофизических свойств используемых изоляционных материалов. Для многих огнеупоров и теплоизоляторов, таких как корундовые или диатомитовые изделия, зависимость коэффициента теплопроводности λ от температуры T является существенно нелинейной и с высокой степенью точности может быть аппроксимирована полиномом второй степени [1]:

$$\lambda(T) = a + b \cdot T + c \cdot T^2.$$

Целью данной работы является разработка и верификация численного алгоритма для решения обратной задачи: по известным значениям температуры T_i , измеренным в фиксированных координатах x_i внутри изоляционного слоя, определить неизвестные коэффициенты a , b , c и температуру на горячей границе T_0 . Такая постановка задачи актуальна, поскольку в реальных условиях прямое измерение температуры на горячей поверхности часто затруднено или невозможно, в то время как термопары могут быть установлены на различных глубинах в теле изоляции.

Рассматривается стационарное одномерное температурное поле в плоском слое материала толщиной δ . На горячей границе ($x = 0$) поддерживается неизвестная температура T_0 , а на холодной границе ($x = \delta$) температура T_c может быть измерена или задана. Через слой проходит постоянный тепловой поток q (Вт/м²) [3, с.101].

Из закона Фурье для стационарного случая:

$$q = -\lambda(T) \frac{dT}{dx} = \text{const.}$$

Разделяя переменные и интегрируя от $x = 0$ (где $T = T_0$) до произвольной точки $x = x_i$ (где $T = T_i$), получаем интегральное соотношение:

$$q \cdot x_i = a \cdot (T_0 - T_i) + (b/2) \cdot (T_0^2 - T_i^2) + (c/3) \cdot (T_0^3 - T_i^3).$$

Данное уравнение является нелинейным относительно четырех неизвестных: a , b , c , T_0 . При наличии $N \geq 5$ пар измерений (x_i, T_i) задача становится переопределенной и может быть решена методом наименьших квадратов.

Прямой поиск минимума суммы квадратов невязок в пространстве четырех переменных является вычислительно сложной задачей из-за существенной нелинейности модели. Однако структура уравнения позволяет понизить размерность задачи оптимизации, выделив линейную подзадачу. На этом основании разработан алгоритм, включающий следующие этапы.

Первый этап заключается в сведении к одномерной оптимизации. Основная идея заключается в том, что при фиксированном значении T_0 интегральное уравнение становится линейным относительно коэффициентов a , b , c . Это позволяет свести исходную 4D-задачу к 1D-задаче минимизации функции стоимости $E(T_0)$, которая представляет собой сумму квадратов невязок между измеренными координатами x_i и координатами, предсказанными моделью.

Второй этап представляет собой решение линейной подзадачи. Для каждого фиксированного T_0 формируется система линейных уравнений $A[a, b, c]^T = \text{rhs}$, где матрица A и вектор правой части rhs строятся на основе измеренных данных. Учитывая плохую обусловленность матрицы ' A ' (из-за различия масштабов столбцов $\sim T_0$, $\sim T_0^2$, $\sim T_0^3$), для решения системы используется метод сингулярного разложения (SVD), обеспечивающий численную устойчивость.

В третий этап входит глобальная оптимизация методом мултистарта. Функция стоимости $E(T_0)$ может иметь несколько локальных минимумов. Для надежного нахождения глобального минимума интервал поиска $[T_{\max} + 1, 3000]$ К (где $T_{\max}$ – максимальная измеренная температура) разбивается на K равных сегментов. В каждом сегменте запускается локальный оптимизатор.

Научное обоснование выбора $K = 100$ сегментов заключается в следующем. Ширина всего интервала поиска составляет примерно 2000 К (при $T_{\max} \approx 1000$ К). Разбиение на 100 сегментов дает ширину одного сегмента около 20 К. Анализ эталонных температурных профилей (например, для корундовых огнеупоров) показывает, что характерные изменения функции $E(T_0)$ происходят на масштабах, значительно превышающих 20 К [4]. Таким образом, такое разбиение гарантирует, что каждый возможный локальный минимум будет полностью содержаться хотя бы в одном сегменте, что является необходимым условием для его обнаружения локальным оптимизатором. С другой стороны, число 100 является компромиссом между надежностью покрытия и вычислительной сложностью, так как общее время работы алгоритма остается менее одной секунды.

Четвертый этап состоит из локальной оптимизации методом Брента. В каждом сегменте для поиска локального минимума функции $E(T_0)$ используется метод Брента. Этот метод был выбран благодаря своей робастности (не требует производных), гарантированной сходимости и сверхлинейной скорости

сходимости на гладких функциях, что позволяет достигать машинной точности ($\sim 10^{-14}$).

На пятом этапе проводилась оценка точности и верификация. После нахождения оптимальных параметров производится оценка погрешности определения T_0 на основе анализа чувствительности функции стоимости. Кроме того, проверяется физическая корректность решения: коэффициент теплопроводности $\lambda(T)$ должен быть положительным во всем рабочем диапазоне температур $[T_{\min}, T_0]$.

Для подтверждения работоспособности и оценки точности предложенного алгоритма была проведена серия вычислительных экспериментов на синтетических данных, сгенерированных в соответствии с методикой. Был взят эталонный профиль температуры для корундовых огнеупоров с известными коэффициентами $a = 0,5064$, $b = -0,000475$, $c = 0,00000026$ [2] и температурой на горячей границе $T_0 = 2000$ К. Из этого профиля были взяты 5 точек измерений, расположенных ближе к холодной стороне слоя.

Алгоритм успешно восстановил исходные параметры. Полученные результаты: $a^* = 0,50679$, $b^* = -0,0004756$, $c^* = 2,6e-7$, $T_0^* = 1999,72$ К. Относительная погрешность для всех параметров составила менее 0,01 %.

Ниже приведена таблица с исходными эталонными координатами и результатами расчета координат по восстановленной модели. Невязки (разности) находятся на уровне машинной точности (таблица 1).

Таблица 1. Температура и ее координата x в слое

Т, К	Х эталонное, м	Х восстановленное, м
2000	0	-0,00007066
1900	0,0242350	0,0241744
1800	0,0462857	0,0462326
1700	0,0663735	0,0663255
1600	0,0847197	0,0846747
1500	0,101546	0,101501
1400	0,117073	0,117028
1300	0,131522	0,131476
1200	0,145116	0,145067
1100	0,158074	0,158022
1000	0,170619	0,170564
900	0,182971	0,182913
800	0,195353	0,195291
762.885	0,200000	0,199937

Для наглядности ниже показан график сравнения эталонного температурного профиля $x(T)$ и профиля, восстановленного по найденным коэффициентам. Графики практически совпадают, что визуально подтверждает высокую точность алгоритма (рисунок 1).

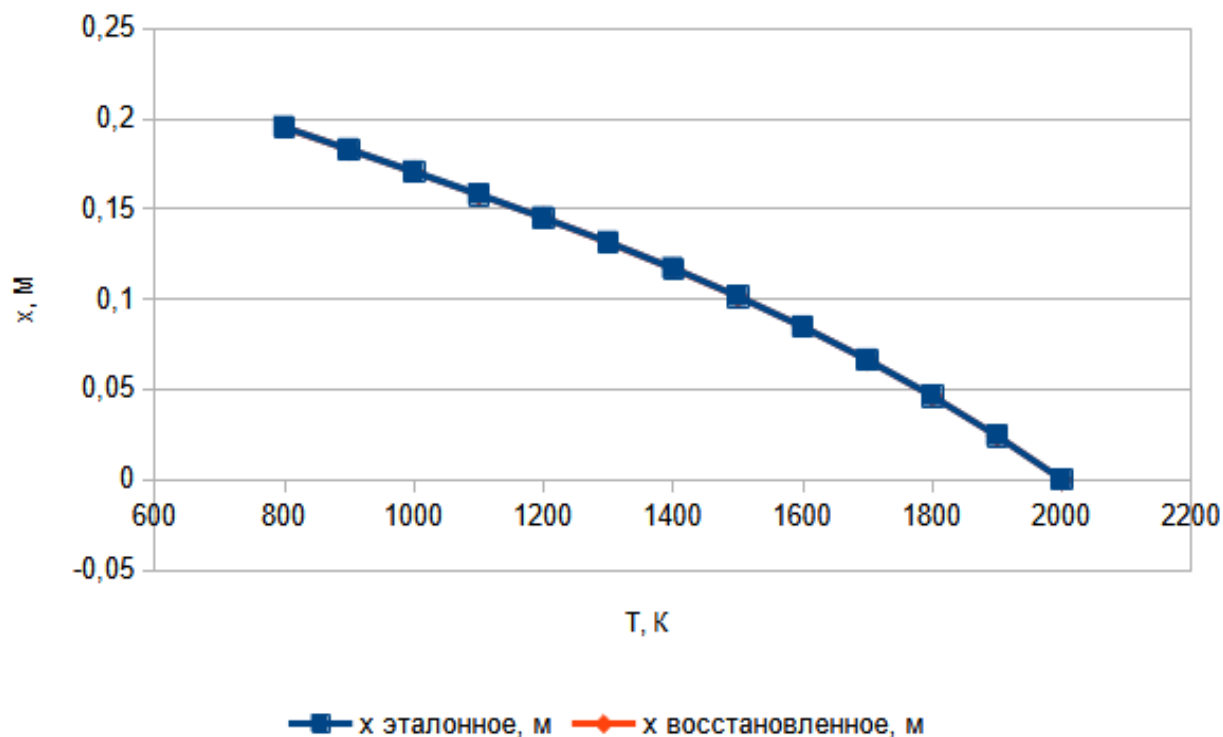


Рисунок 1. Зависимость измеренного (эталонного) и восстановленного расстояния x , м от температуры T , К

В работе разработан и верифицирован численный алгоритм для решения обратной задачи теплопроводности в плоском слое изоляции с нелинейной зависимостью теплопроводности от температуры. Алгоритм позволяет с высокой точностью определять коэффициенты полиномиальной аппроксимации теплопроводности и температуру на недоступной для измерения горячей границе по данным замеров температуры в нескольких точках внутри слоя. Ключевыми особенностями метода являются сведение задачи к одномерной оптимизации, использование SVD для решения плохо обусловленной линейной подзадачи и комбинация мултистартовой глобальной оптимизации с локальным методом Брента для надежного нахождения глобального минимума. Верификация на эталонных данных подтвердила работоспособность и высокую точность предложенного подхода. Разработанная методика может быть использована для определения теплофизических свойств новых высокотемпературных изоляционных материалов по результатам экспериментальных исследований.

Список литературы:

1. Чиркин, В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В. С. Чиркин. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.

2. Тепло- и температуропроводность корундовых огнеупоров на основе полых сфер в интервале температур 500–2000 К в различных газовых средах / С. Л. Бондаренко, Е. Я. Литовский, А. Б. Иванов и др. // ТВТ. – 1986. – Т. 24, № 3. – С. 618–619.
3. Экспериментальная оценка теплофизических характеристик высокотемпературных теплоизоляционных материалов / В. И. Томак, А. С. Бурков, А. М. Рыцарев, В. А. Товстоног // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». – 2020. – № 2 (89).
4. Телгожаева, Ф. С. Оптимизационный метод определения температуры труднодоступной для измерения / Ф. С. Телгожаева // МНИЖ. – 2013. – №4-1 (11). Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsionnyy-metod-opredeleniya-temperatury-trudnodostupnoy-dlya-izmereniya> (25.11.2025).

© Загидуллина А. Н., Чадаев А. Н., 2026

КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПРОЦЕССА СУЛЬФАТНОЙ ВАРКИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПОДХОДА

ассистент **Никешин Владислав Геннадьевич**,
науч. руководитель: зав. кафедрой, канд. техн. наук
Сидельников Владимир Иванович,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В условиях рекордного роста цен на химические реагенты остро стоит проблема высокой ресурсоемкости процесса сульфатной варки целлюлозы. Существующие системы управления не обеспечивают поиск баланса между качеством продукции и экономией дорогостоящих ресурсов. В работе предлагается концепция алгоритма управления себестоимостью на основе принципа взвешенных приоритетов для ключевых технологических параметров. Разработан поэтапный алгоритм поиска «зоны экономического оптимума» с динамическим перераспределением весовых коэффициентов на основе вклада параметров в себестоимость.

Ключевые слова: сульфатная варка, ресурсоэффективность, виртуальный датчик, управление себестоимостью, оптимизация, взвешенные приоритеты, экономический оптимум.

CONCEPT OF A RESOURCE EFFICIENCY MANAGEMENT SYSTEM FOR THE SULFATE PULPING PROCESS BASED ON A MULTI-CRITERIA APPROACH

Assistant Lecturer **Nikeshin Vladislav Gennadievich**,
Academic Advisor: Head of the Department, PhD in Engineering
Sidelnikov Vladimir Ivanovich,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. In the context of record-high prices for chemical reagents, the problem of high resource intensity of the sulfate pulping process has become particularly acute. Existing control systems fail to find a balance between product quality and the conservation of costly resources. This paper proposes a concept of a cost management algorithm based on the principle of weighted priorities for key technological parameters. A step-by-step algorithm for identifying the «zone of economic optimum» has been developed, featuring dynamic redistribution of weighting coefficients based on the parameters' contribution to the production cost.

Keywords: sulfate pulping, resource efficiency, virtual sensor, cost management, optimization, weighted priorities, economic optimum.

Себестоимость продукции в целлюлозно-бумажной промышленности находится под постоянным давлением растущих цен на энергоносители и технологические реагенты. Для такого высокочувствительного процесса, как сульфатная варка целлюлозы, являющегося сердцем всего производственного цикла, задача оптимизации расходов приобретает первостепенное значение. В современных условиях, наряду с традиционным фокусом на энергоэффективность, на первый план выходит минимизация расхода химикатов, в частности, щелочных реагентов, стоимость которых является одной из ключевых статей эксплуатационных затрат.

Процесс сульфатной варки представляет собой сложный многосвязный объект управления, характеризующийся существенными нелинейностями, значительными временными задержками и необходимостью одновременного учета множества взаимовлияющих технологических параметров. Ключевой задачей управления является поддержание заданного качества целлюлозы при минимизации расходов как на химические реагенты, так и на энергоресурсы.

На сегодняшний день на большинстве предприятий управление процессом варки осуществляется с помощью традиционных систем автоматизированного управления на базе ПИД-регуляторов. Однако эти системы часто оказываются не в состоянии эффективно разрешать конфликт между критериями качества, расходом реагентов и энергозатратами. Для гарантированного обеспечения качества технологи часто вынуждены работать с значительным запасом по концентрации щелочи и температурным параметрам, что приводит к систематическому перерасходу дорогостоящих химикатов и тепловой энергии. Таким образом, существующие подходы носят преимущественно реактивный, а не оптимизирующий характер.

Как было написано выше, процесс сульфатной варки целлюлозы является одним из наиболее ресурсоемких переделов в целлюлозно-бумажном производстве. В условиях 2025 года, когда цены на химические реагенты достигли рекордных значений, структура затрат претерпела значительные изменения [1-4]. Ключевыми статьями расходов, как правило, являются: химические реагенты в виде щелочных компонентов NaOH, Na₂S и белильные реагенты, тепловая энергия для нагрева варочного котла и поддержания температурного режима, а также электроэнергия для приводов механизмов и систем автоматизации [5]. Такой перечень затрат требует нового подхода к управлению процессом, ориентированного на ресурсоэффективность и, в первую очередь, на экономию химических реагентов.

Современные системы автоматизации технологических процессов (АСУТП) на большинстве предприятий ориентированы на решение узких задач, например, стабилизации отдельных параметров процесса (температура или давление), поддержание качества целлюлозы по Каппа-числу или контролю расхода отдельных реагентов. Такой подход приводит к «локальной оптимизации», т. е. к улучшению отдельных показателей без учета общего экономического эффекта. Например, оператор может увеличить расход щелочи для гарантированного достижения целевого каппа-числа, но это приводит к перерасходу дорогостоящих реагентов.

Или же снижение температуры варки экономит энергию, но увеличивает продолжительность цикла и может ухудшить равномерность пропитки щелоком. Также не стоит забывать о человеческом факторе и опыте работы каждого отдельного оператора и технолога.

Анализ технологических регламентов и практики ведения процесса показывает, что существует не точка, а область параметров, в которой обеспечивается приемлемое качество целлюлозы при минимальных совокупных затратах. Данная область называется «зона экономического оптимума» и должна характеризоваться минимально достаточными концентрациями химических реагентов, оптимальными температурно-временными параметрами цикла и сбалансированным соотношением между качеством продукции и расходом ресурсов.

Гипотеза заключается в том, что систематический поиск и удержание параметров в этой зоне позволит снизить себестоимость варки на определенный процент без капитальных затрат и ухудшения качества готовой продукции. Такой подход особенно актуален в условиях высокой волатильности цен на химические реагенты, когда «вчерашние» оптимальные режимы сегодня становятся экономически невыгодными.

Основой возможного алгоритма является принцип динамического перераспределения приоритетов между технологическими параметрами на основе их текущего вклада в себестоимость продукции. В отличие от традиционных систем, статически ориентированных на поддержание качества, данный подход предполагает адаптивное управление с экономической обратной связью.

Для реализации алгоритма выбираются 4-5 ключевых управляемых параметра, оказывающих наибольшее влияние на себестоимость, например, концентрация активной щелочи в варочном котле, температурный профиль варки, время цикла (особенно время до максимальной температуры) и гидромодуль (соотношение жидкости и древесины). Каждому параметру присваивается динамический весовой коэффициент, рассчитываемый на основе текущих цен на химические реагенты, стоимости тепловой и электрической энергии, технологических ограничений по качеству целлюлозы.

Алгоритм поиска оптимальной себестоимости может быть реализован как циклический процесс оптимизации, состоящий из шести последовательных этапов, которые представлены на рисунке 1.

К базовому анализу может относиться фиксация текущего режима работы варочного котла, расчет удельной себестоимости тонны целлюлозы по актуальным ценам и определение возможных «запасов» по ключевым параметрам качества.

Приоритизация параметров включает в себя ранжирование управляемых параметров по их вкладу в себестоимость тонны целлюлозы, выбор параметра с наибольшим потенциалом экономии на основании рангов и расчет безопасного диапазона корректировки параметров.

Корректирующее воздействие направлено на плавное изменение выбранного из прошлого шага параметра в сторону экономии. Шаг изменения должен определяться на основе технологических регламентов и статистике процесса.

Мониторинг отклика – это процесс отслеживания реакции варки на корректирующее воздействие, т. е. слежение за контролем качества целлюлозы по

вязкости, Каппа-числу и т. д. Также на этом этапе должен проводиться анализ равномерности варки и пересчет фактической себестоимости.

Этап экономической оценки заключается в сравнении экономии ресурсов с возможными потерями от ухудшения качества и принятии решения о закреплении изменения или возврате к предыдущему значению.

Документирование результата итерации (цикла) необходимо для фиксации успешных корректировок в базе знаний и обновлении весовых коэффициентов для следующих циклов оптимизации.



Рисунок 1. Алгоритм поиска оптимальной себестоимости

Особенностью подобного алгоритма является его цикличность – полный цикл оптимизации повторяется ежедневно, что позволит оперативно реагировать на изменения ценовых условий и технологических характеристик сырья. Накопленная статистика успешных корректировок формирует базу знаний для автоматического принятия решений в будущем или обучения нового персонала.

Дополнительным плюсом такого алгоритма может быть то, что его физическая реализация не требует капитальных вложений в оборудование и может быть выполнена на базе существующих средств автоматизации: датчиков, контроллеров и стандартных промышленных сетей связи, а программный модуль интегрируется в уже существующую на производства АСУТП.

В качестве перспективного направления может рассматриваться применение виртуальных датчиков для расширения измерительных возможностей системы. В данный момент на одном из производств ЦБП применяется виртуальный датчик

индекса разрушающего усилия для косвенной оценки равномерности варки, дополнительного контроля при измерении параметров и формирования предупредительных сигналов [6].

Научная новизна такого направления исследований заключается в разработке методологии адаптивного управления технологическим процессом на основе экономических критериев в режиме, близком к реальному времени и в отличие от известных решений учитывает волатильность цен на химические реагенты и энергоносители, обеспечивает многокритериальную оптимизацию и позволяет накапливать и систематизировать опыт успешных управленческих решений.

Практическая ценность может выражаться в создании тиражируемого решения для целлюлозно-бумажных предприятий, испытывающих аналогичные проблемы с ростом затрат на химические составляющие и энергию.

Предложенная концепция открывает новые возможности для повышения экономической эффективности предприятий целлюлозно-бумажной промышленности в условиях растущих цен.

Список литературы:

1. Информационный портал «MRC». В январе производители химических веществ подняли цена на 2,9% [сайт]. Режим доступа: <https://www.mrc.ru/news/416174-v-yanvare-proizvoditeli-himicheskikh-veschestv-podnyali-ceni-na-29-percent> (20.11.2025).
2. Информационный портал РАО «БумПром». Kemira Oyj повышает цены на ряд химических препаратов для ЦБП на 10-30% [сайт]. Режим доступа: <https://bumprom.ru/news/otraslevye-novosti/kemira-oyj-povyshaet-tseny-na-ryad-khimicheskikh-preparatov-dlya-tsbp-na-10-30> (дата обращения: 21.11.2025).
3. Информационно-аналитический портал о ЦБП «Upackunion». Химия для ЦБП: эволюция российского рынка. Часть 1 [сайт]. Режим доступа: <https://upackunion.ru/novosti/himiya-dlya-czbp-evolyucziya-rossijskogo-rynka-chast-1> (дата обращения: 21.11.2025).
4. Информационный портал «Seldon News». Компания Solenis повышает цены на ряд химических препаратов для ЦБП [сайт]. Режим доступа: <https://myseldon.com/ru/news/index/248902922> (дата обращения: 21.11.2025).
5. Лисиенко, В. Г. Оценка энергоемкости основных производств целлюлозно бумажной промышленности: электронная статья / В. Г. Лисиенко, Т. С. Кириллова, Д. Н. Богословский // Известия высших учебных заведений «Лесной журнал». – 2006. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-energoemkosti-osnovnyh-proizvodstv-tsellyulozno-bumazhnoy-promyshlennosti> (дата обращения: 22.11.2025).
6. 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. – DOI 10.36807/1998-9849-2023-66-92-118-121. – EDN LCVZNK.

РОЛЬ ОСОБЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗОН В РАЗВИТИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

студент Алтамирано Салмерон Куаутемок Бернардович,

студент Нуждин Иван Денисович,

науч. руководитель: канд. экон. наук, доцент Сысоева Ольга Владимировна,

Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова,

Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье проводится комплексный анализ роли особых экономических зон в формировании и модернизации энергетической инфраструктуры Российской Федерации. Исследуются механизмы налогового и таможенного стимулирования резидентов, приводятся конкретные примеры реализации энергетических проектов. Проводится сравнительный анализ динамики инвестиций в ОЭЗ и структуры энергогенерации страны. Формулируются рекомендации по повышению эффективности энергетической составляющей ОЭЗ.

Ключевые слова: особая экономическая зона, энергетическая инфраструктура, инвестиции, налоговые льготы, энергогенерация, возобновляемые источники энергии, промышленное производство, модернизация.

THE ROLE OF SPECIAL ECONOMIC ZONES IN THE DEVELOPMENT OF ENERGY INFRASTRUCTURE OF THE RUSSIAN FEDERATION

Student Altamirano Salmeron Kuautemok Bernardovich,

Student Nuzhdin Ivan Denisovich,

Academic Advisor: PhD in Economics, Associate Professor

Syssoeva Olga Vladimirovna,

Plekhanov Russian University of Economics,

Moscow, Russian Federation

Abstract. The article provides a comprehensive analysis of the role of special economic zones in the formation and modernization of the energy infrastructure of the Russian Federation. The mechanisms of tax and customs incentives for residents are examined, and specific examples of energy projects are provided. A comparative analysis of the dynamics of investments in SEZs and the structure of energy generation in the country is conducted. Recommendations for improving the efficiency of the energy component of SEZs are formulated.

Keywords: special economic zone, energy infrastructure, investments, tax incentives, energy generation, renewable energy sources, industrial production, modernization.

В условиях глобальной энергетической трансформации и необходимости обеспечения технологического суверенитета Российская Федерация сталкивается с задачей масштабной модернизации энергетической инфраструктуры. По данным

Системного оператора Единой энергетической системы России, потребление электроэнергии в 2024 году составило 1191,7 млрд кВт·ч, увеличившись на 3,1 % по сравнению с 2023 годом [1]. Обеспечение растущего спроса требует не только ввода новых генерирующих мощностей, но и совершенствования механизмов привлечения инвестиций в энергетический сектор.

Одним из ключевых институциональных инструментов стимулирования инвестиционной активности являются особые экономические зоны (ОЭЗ). По итогам 2024 года резиденты ОЭЗ вложили в проекты более 1,2 трлн рублей, что вдвое превышает результат 2023 года, а количество новых рабочих мест достигло 25 тысяч – на 40 % больше, чем годом ранее [2]. Данная динамика свидетельствует о возрастающей роли ОЭЗ как драйвера экономического развития, в том числе в сфере энергетики.

Целью настоящего исследования является комплексный анализ взаимосвязи между функционированием ОЭЗ и развитием энергетической инфраструктуры Российской Федерации на основе актуальных данных 2023–2024 годов.

Для понимания роли ОЭЗ в энергетическом секторе необходимо охарактеризовать текущее состояние электроэнергетики страны. На 1 января 2025 года установленная мощность электростанций России составила 269 892 МВт [1]. Структура выработки электроэнергии за 2024 год представлена в таблице 1.

Таблица 1. Структура выработки электроэнергии в Единой энергетической системе России за 2024 год [1]

Тип генерации	Доля в выработке, %	Изменение к 2023 г., %	Мощность, ГВт
ТЭС	57,3	+3,6	188,4
АЭС	18,2	–0,9	28,6
ГЭС	17,3	+4,9	52,9
Промпредприятия	6,1	+0,5	–
ВЭС	0,7	+27,3	1,8
СЭС	0,3	+9,6	2,5

Анализ данных таблицы 1 свидетельствует о том, что основу энергетики России по-прежнему составляют тепловые электростанции, обеспечивающие 57,3 % выработки. Вместе с тем наблюдается стремительный рост возобновляемых источников энергии (ВИЭ): выработка ветровых электростанций увеличилась на 27,3 %, солнечных – на 9,6 %. В 2025 году запланирован ввод 3972,5 МВт новых мощностей, из которых 1555,2 МВт приходится на объекты ВИЭ [1]. Эти тенденции создают предпосылки для размещения энергогенерирующих объектов нового поколения, в том числе на территориях ОЭЗ.

Отчёт Минэкономразвития России о результатах работы ОЭЗ за 2024 год фиксирует существенный рост ключевых показателей. Динамика инвестиций и занятости представлена в таблице 2.

Таблица 2. Динамика ключевых показателей ОЭЗ России, 2022–2024 гг. [2, 3]

Показатель	2022	2023	2024
Инвестиции за год, млрд руб.	~500	660	1 200
Новых резидентов за год	—	176	192
Новых рабочих мест за год, тыс.	—	18,1	25,0
Затраты на НИОКР, млрд руб.	—	~22	35+
Показатель эффективности, %	93,9	92,0	90,0
Кол-во ОЭЗ в оценке	38	45	50

Из таблицы 2 следует парадоксальная тенденция: при удвоении инвестиций в 2024 году показатель общей эффективности снизился с 93,9 % в 2022 году до 90,0 % в 2024 году. Объясняется это включением в оценку 20 новых ОЭЗ, созданных в 2020–2022 годах, которые ещё не вышли на проектную мощность [2]. Данный факт имеет непосредственное отношение к энергетической инфраструктуре: именно готовность инженерных сетей и энергоснабжения является одним из главных факторов, определяющих скорость выхода новой ОЭЗ на полную загрузку.

Особого внимания заслуживает рост затрат на НИОКР (на 60 %, свыше 35 млрд рублей), что свидетельствует о переходе резидентов ОЭЗ от простого размещения производств к разработке новых технологий, включая энергоэффективные решения [2].

ОЭЗ «Алабуга» (Республика Татарстан) – крупнейшая промышленно-производственная ОЭЗ России, лидер рейтинга эффективности 2024 года. Территория площадью 2000 гектаров полностью обеспечена инженерной инфраструктурой. Теплоснабжение осуществляется Елабужской ТЭЦ тепловой мощностью 420 Гкал/ч, выкупленной управляющей компанией ОЭЗ в 2016 году [4]. Правительство Российской Федерации выделило 464 млн рублей на создание новых распределительных подстанций и электрических сетей в индустриальном парке «Синергия» [5]. Среди резидентов – завод «Umatex» (ГК «Росатом») по производству ПАН-прекурсора для углеродного волокна, «RMA Рус» (шаровые краны для газодобычи), «Rockwool» (теплоизоляция), «Air Liquide» (промышленные газы) [4]. На территории ОЭЗ функционирует образовательный центр «Алабуга Политех» с подготовкой по направлениям «энергетика» и «автоматизация систем управления» [6].

ОЭЗ «Тольятти» (Самарская область) по итогам 2024 года достигла 100 % эффективности функционирования. Инвестиции резидентов выросли на 41 % и составили 16 млрд рублей, выручка превысила 30 млрд рублей (рост в 2 раза), налоговые отчисления увеличились в 2,5 раза до 3,8 млрд рублей [7]. Принципиально важным является то, что в 2024 году новыми резидентами стали компании по производству оборудования для альтернативной энергетики [7], что демонстрирует формирование энергетического кластера на территории ОЭЗ. Строится третья очередь зоны, запуск которой запланирован на 2026 год.

Таблица 3. Сравнительная характеристика энергетической составляющей ведущих ОЭЗ

Параметр	ОЭЗ «Алабуга»	ОЭЗ «Тольятти»
Год создания	2006	2010
Собственная генерация	ТЭЦ, 420 Гкал/ч	Нет
Энергоёмкие резиденты	Росатом, Air Liquide	Альт. энергетика
Инвестиции 2024, млрд руб.	>50	16
Подготовка кадров в энергетике	Да (Политех)	Нет

Данные таблицы 3 показывают различие моделей энергетического обеспечения ОЭЗ. «Алабуга» демонстрирует интегрированный подход: собственная генерация, энергоёмкие резиденты из высокотехнологичных секторов и подготовка кадров. «Тольятти» эволюционирует от автокомпонентной специализации к энергетическому кластеру.

Мировым лидером по эффективности использования СЭЗ является Китайская Народная Республика. СЭЗ Шэньчжэнь, созданная в 1980 году, за 40 лет трансформировалась из рыбацкого посёлка с населением 30 тысяч человек в мегаполис с ВВП свыше 400 млрд долларов [8]. Среди приоритетных направлений инвестирования – ядерная энергетика, электроника и высокие технологии. На территории зоны функционирует более 17,5 тысяч предприятий [8].

Принципиальным отличием китайской модели является масштаб государственных вложений в инфраструктуру, включая энергетическую. В первые 5 лет существования китайские СЭЗ привлекли 20 % всех прямых иностранных инвестиций в страну [9].

Таблица 4. Сравнение систем ОЭЗ России и Китая

Критерий	Россия	Китай
Начало функционирования	2005 г.	1980 г.
Количество ОЭЗ	59 (2025)	Более 2500 (все типы)
Налог на прибыль	от 2 %	15 % (вместо 25 %)
Энергетика как приоритет	Частично	Да (ядерная, ВИЭ)
Подготовка кадров в зонах	Единичные случаи	Системно (мегавузы)

Таблица 4 выявляет ключевые различия двух моделей. Китай системно интегрирует энергетику в стратегию развития СЭЗ, создавая крупные университетские кампусы на территориях зон и определяя ядерную и альтернативную энергетику как приоритетные направления. В России энергетическая составляющая ОЭЗ развивается преимущественно реактивно, в ответ на потребности уже привлечённых резидентов, а не проактивно, как элемент стратегического планирования.

На основе проведённого анализа выявлены следующие ключевые проблемы развития энергетической составляющей ОЭЗ.

Во-первых, сохраняется разрыв между потребностями резидентов и фактической готовностью энергетической инфраструктуры. Из 50 оцениваемых ОЭЗ 20 созданы в 2020–2022 годах и не вышли на проектную мощность, в том числе из-за незавершённости инженерных сетей [2].

Во-вторых, рост тарифов на электроэнергию оказывает давление на экономику резидентов. В 2024 году ФАС утвердила индикативные цены на электроэнергию на 2026 год с повышением в IV квартале [10], что частично нивелирует эффект от налоговых льгот, особенно для энергоёмких производств.

В-третьих, реформирование системы льгот создаёт неопределённость. Минфин России предложил ограничить объём налоговых преференций для новых резидентов суммой фактических капиталовложений начиная с 2026 года [11]. Данные изменения направлены на повышение результативности, однако могут отпугнуть инвесторов на этапе проектирования.

Перспективными направлениями развития являются: внедрение объектов распределённой генерации на территориях ОЭЗ (микросети, когенерационные установки); размещение объектов ВИЭ – в 2024 году выработка ветроэлектростанций в России выросла на 27,3 % [1], что создаёт экономическую базу для подобных проектов; автоматизация систем управления энергоснабжением на основе технологий «умных сетей»; формирование энергетических кластеров по образцу ОЭЗ «Тольятти», где в 2024 году появились первые резиденты из сектора альтернативной энергетики [7]; системная интеграция подготовки кадров для цифровой энергетики по модели «Алабуга Политех» [6].

Проведённый анализ позволяет сделать следующие выводы. Особые экономические зоны играют возрастающую роль в развитии энергетической инфраструктуры Российской Федерации: удвоение инвестиций в 2024 году (до 1,2 трлн рублей), рост НИОКР на 60 % и появление резидентов из сектора альтернативной энергетики свидетельствуют о качественной трансформации ОЭЗ от площадок размещения производств к инновационным экосистемам.

Вместе с тем выявлены существенные проблемы: разрыв между созданием зон и готовностью энергетической инфраструктуры, рост тарифов и неопределённость реформы льгот. Сравнение с опытом Китая показывает, что для повышения эффективности необходимо перейти от реактивной модели (создание инфраструктуры вслед за резидентами) к проактивной (опережающее развитие энергетической инфраструктуры как фактор привлечения инвесторов).

Рекомендуется: включить показатели энергетической готовности в систему оценки эффективности ОЭЗ; стимулировать размещение объектов ВИЭ на территориях зон; создать механизмы государственно-частного партнёрства для финансирования энергетической инфраструктуры; масштабировать опыт подготовки кадров для энергетики по модели «Алабуга Политех» на другие ОЭЗ.

Список литературы:

1. Фёдор Опадчий: Энергопотребление в России в 2024 году увеличилось на 3,1 %. – Текст: электронный // АО «Системный оператор Единой энергетической системы»: [сайт]. – 2025. – URL: <https://www.so-ups.ru/news/press-release/press-release-view/news/26552/> (дата обращения: 15.03.2026).

2. Минэкономразвития: резиденты ОЭЗ практически удвоили инвестиции в 2024 году. – Текст: электронный // Министерство экономического развития Российской Федерации: [сайт]. – 2025. – URL: https://economy.gov.ru/material/news/minekonomrazvitiya_rezidenty_oez_prakticheski_udvoili_investicii_v_2024_godu.html (дата обращения: 15.03.2026).
3. Минэкономики оценило результаты работы особых экономических зон в 2024 году. – Текст: электронный // Бюджет. – 2025. – URL: <https://bujet.ru/article/506585.php> (дата обращения: 15.03.2026).
4. Алабуга (особая экономическая зона). – Текст: электронный // Википедия: [сайт]. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Алабуга_\(особая_экономическая_зона\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Алабуга_(особая_экономическая_зона)) (дата обращения: 15.03.2026).
5. Правительство направит 464 млн рублей на возмещение затрат на создание инфраструктуры в ОЭЗ «Алабуга» в Татарстане. – Текст: электронный // Правительство России: [сайт]. – 2023. – URL: <http://government.ru/docs/41063/> (дата обращения: 15.03.2026).
6. ОЭЗ ППТ «Алабуга». – Текст: электронный // Национальный реестр ОЭЗ: [сайт]. – URL: <https://xn--g1an9b.xn--p1ai/zone/alabuga/> (дата обращения: 15.03.2026).
7. По итогам 2024 года ОЭЗ «Тольятти» достигла 100 % эффективности функционирования. – Текст: электронный // TLT.ru. – 2025. – URL: <https://tlt.ru/business/po-itogam-2024-goda-oezh-tolyatti-dostigla-100-ehffektivnosti-funkcionirovaniya/2260138> (дата обращения: 15.03.2026).
8. Особые экономические зоны в Китае. – Текст: электронный // GDP Квадрат: [сайт]. – URL: <https://gdpquadrat.com/digest/instrument-razvitiya/oez-kitaya/> (дата обращения: 15.03.2026).
9. Печерица, В. Ф. Свободные экономические зоны КНР – локомотивы китайской экономики: опыт для России / В. Ф. Печерица. – Текст: электронный // Таможенная политика России на Дальнем Востоке. – 2013. – № 2 (63). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/svobodnye-ekonomicheskie-zony-knr-lokomotivy-kitayskoj-ekonomiki-opyt-dlya-rossii> (дата обращения: 15.03.2026).
10. ФАС утвердила цены на электроэнергию и мощность на 2026 год. – Текст: электронный // Энергетика и промышленность России. – 2026. – URL: <https://www.eprussia.ru/news/base/2026/9759402.htm> (дата обращения: 15.03.2026).
11. Налоговые льготы для участников ОЭЗ и ТОР. – Текст: электронный // Melling, Voitishkin & Partners. – 2025. – URL: <https://mv.legal/articles/nalogovye-lgoty-dlya-uchastnikov-oez-i-tor/> (дата обращения: 15.03.2026).

© Алтамирано Салмерон Куаутеок Бернардович, Нуждин И. Д., 2026

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ РАССИНХРОНИЗАЦИИ ДАННЫХ ДАТЧИКОВ В РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ

аспирант **Рачкин Андрей Игоревич**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент **Мишин Алексей Владимирович**,
Автономная некоммерческая организация высшего образования
Московский университет «Синергия»,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. В работе приведен анализ необходимости процесса синхронизации данных с датчиков в распределенных измерительных системах на примере разработанной концептуальной модели системы контроля и управления сварочным процессом. Рассмотрено влияние временной рассинхронизации измеряемых параметров на формирование признаков, используемых алгоритмом машинного обучения. Показано, что временные сдвиги данных датчиков могут приводить к снижению точности классификации и искажению оценки состояния технологического процесса.

Ключевые слова: распределенные измерительные системы, машинное обучение, цифровой двойник, синхронизация данных, процесс сварки кузовных деталей, анализ данных, датчики, микросервисная архитектура.

INVESTIGATION OF TEMPORARY DESYNCHRONIZATION OF SENSOR DATA IN DISTRIBUTED MEASUREMENT SYSTEMS OF ROBOTIC COMPLEXES

Postgraduate Student **Rachkin Andrey Igorevich**,
Academic Advisor: PhD in Engineering, Associate Professor
Mishin Alexey Vladimirovich,
Autonomous Non-profit Organization of Higher Education
Moscow University «Synergy»,
Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper provides an analysis of the need for data synchronization from sensors in distributed measuring systems using the example of the developed conceptual model of the welding process monitoring and control system. The influence of time desynchronization of measured parameters on the formation of features used by the machine learning algorithm is considered. It is shown that time shifts in sensor data can lead to a decrease in classification accuracy and a distortion of the assessment of the state of the technological process.

Keywords: distributed measurement systems, machine learning, digital twin, data synchronization, body parts welding process, data analysis, sensors, microservice architecture.

Современные роботизированные производственные комплексы представляют собой сложные киберфизические системы, в которых процессы измерения, обработки данных и управления осуществляются в распределённой архитектуре. Сигналы от датчиков передаются в контроллеры и вычислительные модули по промышленным сетям, после чего обрабатываются алгоритмами анализа данных и используются для принятия решений.

Измерительные данные формируются на физических устройствах, оцифровываются с различной частотой дискретизации и передаются в вычислительные модули по сетевым каналам связи, для которых характерны переменные задержки передачи данных. Дополнительные задержки возможны на этапе обработки сигналов, включая фильтрацию измерений, формирование агрегированных признаков и выполнение алгоритмов машинного обучения. В результате при формировании вектора признаков, описывающего состояние технологического процесса, можно столкнуться с появлением временной рассинхронизацией между отдельными измеряемыми параметрами [1, с. 75–77].

Методы машинного обучения получили широкое распространение в системах контроля качества технологических процессов, в частности, таких процессов как промышленная сварка. Использование моделей классификации позволяет на основе совокупности измеряемых параметров выявлять дефекты сварных соединений, отклонения технологических режимов и другие аномалии процесса. При этом обычно предполагается, что входные признаки корректно отражают состояние объекта управления и относятся к одному и тому же моменту времени. Иными словами, параметры рассматриваются как синхронные характеристики процесса в момент времени t [2, с. 76].

Даже при малых задержках (десятки миллисекунд) возможно формирование признакового вектора входных значений, элементы которого относятся уже к другим фазам технологического процесса. Для быстропротекающих процессов, к которым относится точечная сварка, подобные временные задержки сопоставимы с характерным временем изменения тока, температуры и сопротивления контакта. Это может приводить к искажению представления о текущем состоянии сварочной точки и, как следствие, к снижению корректности принимаемых решений.

Несмотря на широкое применение алгоритмов машинного обучения в системах промышленного контроля, влияние временной рассинхронизации измеряемых параметров на качество работы таких алгоритмов остаётся одним из ключевых факторов, влияющих на стабильную оценку состояния технологического процесса. Реальная распределённая система характеризуется наличием сетевых и вычислительных задержек, а также различий в частоте дискретизации.

Синхронизация данных и отсутствие задержек играют важную роль в распределённой измерительной системе, поскольку ошибка классификации может приводить как к пропуску дефектного изделия, так и к необоснованной остановке технологического оборудования. Таким образом, возникает необходимость оценки влияния временной рассинхронизации данных датчиков на корректность функционирования распределённой измерительной системы.

Целью работы является экспериментальная оценка влияния временной рассинхронизации данных датчиков на корректность функционирования распределённой измерительной системы контроля качества сварочного процесса.

В рамках данной работы в качестве объекта моделирования работы распределенной измерительной системы выбран процесс точечной контактной сварки кузовных компонентов на автомобильном производстве. Данный технологический процесс является одним из ключевых этапов производства кузова автомобиля и напрямую влияет на качество изготавливаемой продукции.

Процесс точечной сварки характеризуется высокой скоростью протекания и значительной чувствительностью к изменению технологических параметров. К таким параметрам можно отнести сварочный ток, усилие прижатия электродов и температурный режим в зоне контакта.

Контроль указанных параметров осуществляется с использованием датчиков, размещённых на элементах технологического оборудования. Для обеспечения регистрации, передачи и обработки измеряемых параметров применяется распределённая измерительно-вычислительная система, включающая датчики технологических параметров, устройства сбора данных и вычислительные узлы обработки информации. Такая архитектура позволяет осуществлять мониторинг состояния сварочного процесса и формировать информационную основу для оценки качества сварных соединений.

Вместе с тем распределённый характер измерительной системы приводит к возникновению дополнительных факторов, влияющих на корректность формирования данных, в частности, временных задержек передачи сигналов и различий в частоте дискретизации измерительных каналов. В результате возможно возникновение временной рассинхронизации измеряемых параметров, что может приводить к искажению представления о текущем состоянии технологического процесса и снижению достоверности принимаемых решений при обработке данных [3, с. 20–21].

На примере разработанной концептуальной модели распределенной измерительной системы контроля качества сварочного процесса проведем анализ влияния задержки и рассинхронизации данных на точность предсказания дефектов модели машинного обучения. Архитектура концептуальной модели распределенной измерительной системы контроля качества сварочного процесса приведена на рисунке 1.

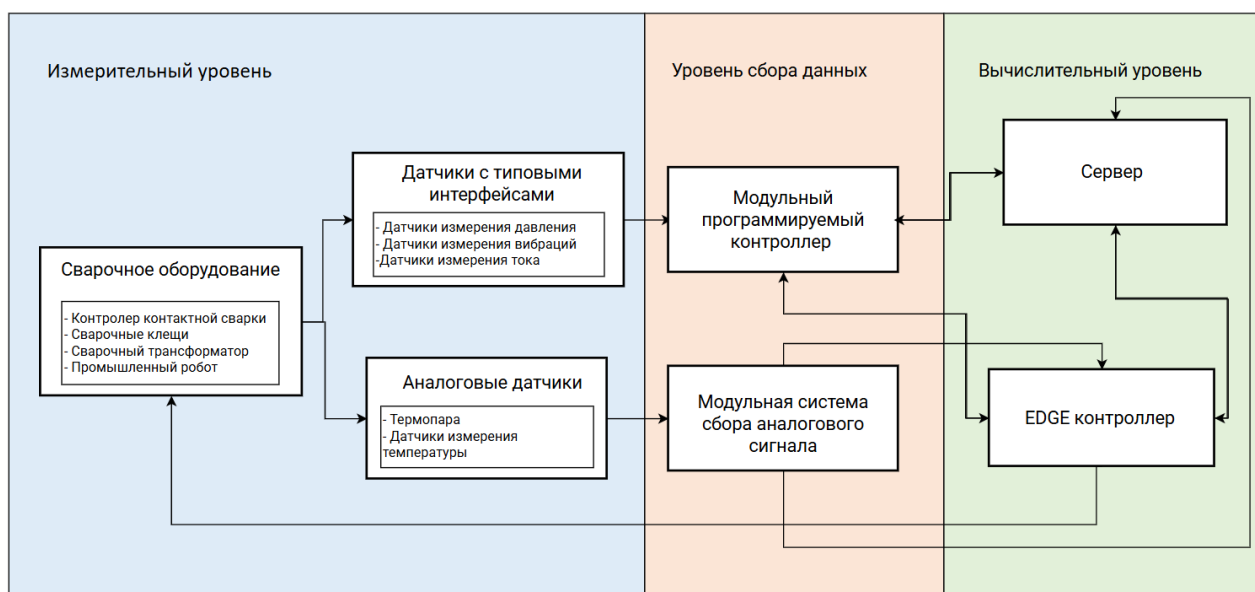


Рисунок 1. Архитектура концептуальной модели распределенной вычислительной системы контроля качества сварочного процесса

Распределённая измерительная система контроля качества сварочного процесса представлена в виде многоуровневой архитектуры, включающей измерительный уровень, уровень сбора данных и вычислительный уровень обработки информации. Подобная архитектура системы обеспечивает регистрацию технологических параметров, их передачу в вычислительную среду и последующий анализ полученных данных.

Измерительный уровень объединяет датчики, размещённые на физическом оборудовании. Их назначением является регистрация параметров, характеризующих физическое состояние сварочного процесса. К основным измеряемым величинам относятся сварочный ток, температура в зоне контакта электродов и усилие их прижатия. Получаемые данные формируют первичную информационную базу, необходимую для дальнейшей обработки и оценки состояния технологического процесса.

На уровне сбора данных осуществляется прием сигналов от измерительных каналов, их преобразование в цифровую форму и последующая передача в вычислительные узлы системы. На данном этапе выполняется объединение поступающих данных, их предварительная обработка и подготовка к дальнейшему анализу. Кроме того, устройства этого уровня обеспечивают передачу измерительной информации по сетевым интерфейсам в систему обработки.

Вычислительный уровень предназначен для обработки и анализа поступающих данных. Данный уровень отвечает за фильтрацию сигналов, формирование информативных признаков, а также применение алгоритмов машинного обучения. Полученные результаты могут использоваться как для мониторинга качества сварных соединений, так и для поддержки принятия решений в системе управления производством [4, с. 133–134].

Рассматриваемая архитектура обеспечивает распределённый характер регистрации и обработки измерительной информации, что позволяет осуществлять наблюдение за параметрами сварочного процесса в режиме реального времени. Но

как следствие, наличие многоуровневой архитектуры может приводить к появлению временных задержек при передаче и обработке сигналов. В результате возникает вероятность временной рассинхронизации измеряемых параметров, что способно повлиять на корректность анализа состояния технологического процесса. Данная проблема обуславливает необходимость исследования влияния рассинхронизации данных на результаты обработки информации в системе.

Для функционирования распределённой измерительной системы контроля сварочного процесса определяется набор технологических параметров, характеризующих формирование сварного соединения. Измеряемые датчиками параметры регистрируются в процессе сварки и используются для последующего анализа и формирования признаков для алгоритмов машинного обучения [5, с. 125–127].

Входные параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1. Входные параметры

Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Источник данных
Ток сварки	$I(t)$	А	Датчик тока
Напряжение	$U(t)$	В	Сварочный трансформатор
Температура электрода	$T_e(t)$	°С	Термопара
Температура зоны сварки	$T_w(t)$	°С	Инфракрасный датчик/термопара
Давление	$P(t)$	кПа	Датчик давления
Виброскорость	$V(t)$	м/с ²	Акселерометр
Время сварки	t	Мс	Таймер контроллера

Качество шва (Q) описывается моделью по формуле (1):

$$Q(t) = f_{ML} \left(\overline{I(t)}, \overline{U(t)}, \overline{T_e(t)}, \overline{T_w(t)}, \overline{P(t)}, \overline{V(t)}, \sigma_I, \left(\frac{dI}{dt} \right)_{\max}, \Delta T_e, t_{\text{cycle}} \right), \quad (1)$$

где f_{ML} – модель машинного обучения;

$\bar{X}$ – среднее значение параметра за сварочный цикл;

$I(t)$ – ток сварки (А);

$U(t)$ – напряжение (В);

$T_e(t)$ – температура электрода (°С);

$T_w(t)$ – температура зоны сварки (°С);

$P(t)$ – давление (кПа);

$V(t)$ – виброскорость (м/с²);

σ_I – стандарт отклонение тока сварки (А);

$\left(\frac{dI}{dt} \right)_{\max}$ – максимальный градиент тока;

ΔT_e – перепад температуры за цикл;

t_{cycle} – время сварочного цикла;

Метрики:

- классификация: $Q \in \{0,1\}$ (годен/брак);
- классификация дефекта сварного шва: прожог, недовар, трещины.

Для решения задачи оценки качества сварного соединения была использована модель случайного леса (Random Forest Classifier). Выбор данного метода обусловлен его устойчивостью к шуму и аномалиям, возможностью эффективной работы с ограниченными по объёму выборками, а также возможностью анализа значимости используемых признаков. В ходе эксперимента обучение модели выполнялось с различным количеством деревьев в ансамбле от 50 до 300. Это позволило оценить влияние размера ансамбля на точность классификации и выбрать наиболее устойчивую конфигурацию модели.

Для каждого класса вычисляется:

- TP (истинноположительный класс);
- FP (ложноположительный класс);
- FN (ложноотрицательный класс);
- Precision (точность): $\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}$
- Recall (полнота): $\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}$
- F1-score: $\text{F1-score} = \frac{2 \cdot (\text{Precision} \cdot \text{Recall})}{\text{Precision} + \text{Recall}}$

Метрики по классам приведены в таблице 2.

Таблица 2. Метрики эффективности модели машинного обучения

Класс	TP	FP	FN	Precision	Recall	F1-score
Прожог	95	5	4	$95 / (95 + 5) \approx 0.95$	$95 / (95 + 4) \approx 0.95$	0.95
Трещины	97	5	2	$97 / (97 + 5) \approx 0.951$	$97 / (97 + 2) \approx 0.97$	0.961
Нет дефекта	687	8	3	$687 / (687 + 8) \approx 0.988$	$687 / (687 + 3) \approx 0.995$	0.991
Недовар	86	4	4	$86 / (86 + 4) \approx 0.95$	$86 / (86 + 4) \approx 0.95$	0.95

Итоговые метрики:

- Accuracy (общая точность):

$$\text{Accuracy} = \frac{95 + 97 + 687 + 86}{95 + 5 + 4 + 97 + 5 + 2 + 687 + 8 + 3 + 86 + 4 + 4} = 0.975$$

- Macro Avg F1 (среднее по классам):

$$\text{Macro Avg F1} = \frac{0.95 + 0.961 + 0.991 + 0.95}{4} = 0.963$$

- Weighted Avg F1 (взвешенное среднее с учетом размера классов):

$$\text{Weighted Avg F1} = \frac{0.95 \cdot 104 + 0.961 \cdot 104 + 0.991 \cdot 698 + 0.95 \cdot 94}{1000} = 0.979$$

Вывод анализа модели:

Модель показала высокую точность в 97.5 %, что означает, что из 1000 случаев модель правильно классифицировала 975.

Полученные результаты демонстрируют высокую точность классификации дефектов при использовании синхронных данных датчиков. Однако в распределённых измерительных системах возможны временные задержки передачи сигналов от отдельных измерительных каналов. Для оценки влияния подобных задержек был проведён эксперимент, в рамках которого в данные температурного датчика искусственно вводился временной сдвиг.

Предположим, что датчик температуры запаздывает на 40 мс. Тогда значения температуры начинают относиться к другому моменту сварочного цикла.

Метрики по классам с учетом рассинхронизации поступающих в модель данных приведены в таблице 3.

Таблица 3. Метрики эффективности модели с использованием машинного обучения

Класс	TP	FP	FN	Precision	Recall	F1-score
Прожог	78	14	15	$78 / (78 + 14) \approx 0.848$	$78 / (78 + 15) \approx 0.838$	0.842
Трещины	80	11	10	$80 / (80 + 11) \approx 0.879$	$80 / (80 + 10) \approx 0.88$	0.88
Нет дефекта	673	25	12	$673 / (673 + 25) \approx 0.964$	$673 / (673 + 12) \approx 0.982$	0.972
Недовар	61	8	13	$61 / (61 + 8) \approx 0.884$	$61 / (61 + 13) \approx 0.824$	0.852

Итоговые метрики:

– Ассурасу (общая точность):

Assurasy

$$= \frac{78 + 80 + 673 + 61}{78 + 14 + 15 + 80 + 11 + 10 + 673 + 25 + 12 + 61 + 8 + 13} = 0.892$$

– F1 Macro (среднее по классам):

$$\text{F1 Macro} = \frac{0.842 + 0.88 + 0.972 + 0.852}{4} = 0.886$$

– F1 Weighted (взвешенное среднее с учетом размера классов):

$$\text{F1 Weighted} = \frac{0.842 \cdot 107 + 0.88 \cdot 101 + 0.972 \cdot 710 + 0.852 \cdot 82}{1000} = 0.938$$

Вывод анализа модели:

Как видно из результатов анализа, точность предсказания модели начала падать и составила 89.2 %.

Динамика зависимости точности модели от задержки датчика температуры приведена на рисунке 2.

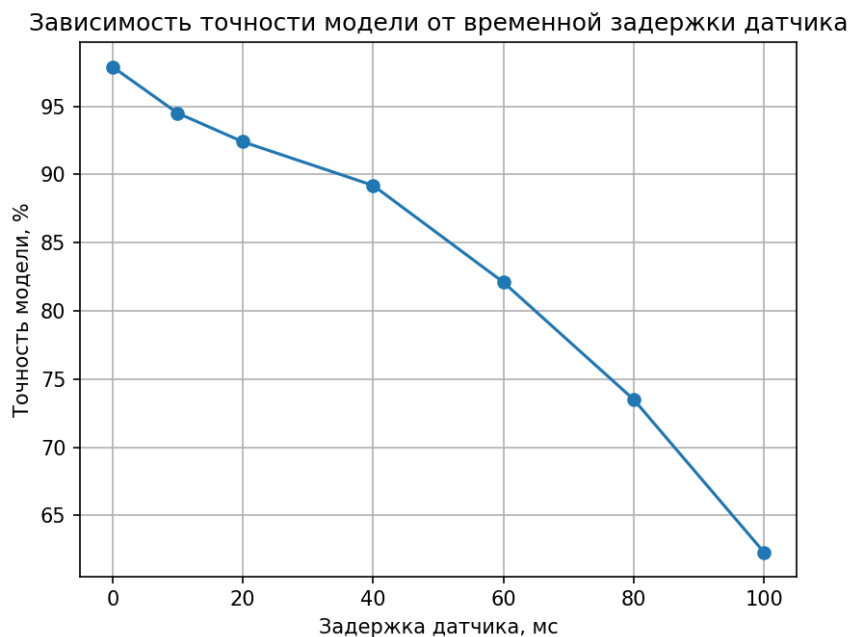


Рисунок 2. График зависимости точности модели от временной задержки датчика температуры

Проведённый эксперимент показал, что рассогласование во времени данных, поступающих от датчиков распределённой измерительной системы, заметно влияет на корректность работы алгоритмов машинного обучения. С увеличением задержки между измерительными каналами наблюдается снижение точности классификации дефектов сварного соединения. Полученные результаты свидетельствуют о том, что даже при использовании предварительно обученной модели нарушение временной согласованности параметров приводит к формированию искажённых наборов признаков и увеличению количества ошибочных предсказаний. Это указывает на необходимость учёта временной синхронизации измерительных данных при разработке измерительно-вычислительных систем контроля технологических процессов.

Список литературы:

1. Варламов, О. О. О метрике автономности и интеллектуальности робототехнических комплексов и киберфизических систем / О. О. Варламов // Радиопромышленность. – 2018. – Т. 28, № 1. – С. 70–78. – DOI 10.21778/2413-9599-2018-28-1-70-78.
2. Яковлев, Н. Б. Модели управления качеством на основе больших данных и машинного обучения / Н. Б. Яковлев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 8. – С. 74–80. – DOI 10.24412 /2071-6168-2025-8-74-75.

3. Черепенин, В. А. Интеграция и оптимизация систем облачных, туманных и граничных вычислений: моделирование, задержки и алгоритмы / В. А. Черепенин, С. П. Воробьев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2024. – № 3 (223). – С. 19–25.
4. Малютин, А. Г. Архитектурные аспекты реализации корпоративной информационной системы мониторинга и учета ресурсов / А. Г. Малютин, А. А. Лаврухин, А. С. Окишев // Известия Транссиба. – 2017. – № 4 (32). – С. 130–141.
5. Речкалов, А. В. Концепция системного представления предметной области при формировании цифрового двойника производственного процесса машиностроительного предприятия / А. В. Речкалов [и др.] // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2022. – Т. 26, № 1 (95). – С. 120–135. – DOI 10.54708/19926502-2022-26195120.

© Рачкин А. И., 2026

СПЕКТР ВОЗМОЖНОСТЕЙ: СРАВНЕНИЕ РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ И БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

студент **Никулина Елизавета Максимовна**,
студент **Галимуллина Илюза Ильшатовна**,
науч. руководитель: канд. физ.-мат. наук, доцент
Хуснутдинов Рустем Рауфович,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В данной работе представлен развернутый сравнительный анализ двух основных типов ядерных реакторов: тепловых и быстрых нейтронов. Подробно рассматриваются фундаментальные физические различия, обусловленные спектром нейтронов, особенности поддержания цепной реакции, а также ключевые принципы выбора замедлителя и теплоносителя. Особое внимание уделяется влиянию этих параметров на эффективность деления.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловые нейтроны, быстрые нейтроны, спектр нейтронов, замедлитель, теплоноситель, ядерное топливо, радиоактивные отходы, реактор на быстрых нейтронах, реактор на тепловых нейтронах.

SPECTRUM OF OPPORTUNITIES: COMPARISON OF THERMAL AND FAST NEUTRON REACTORS

Student **Nikulina Elizaveta Maksimovna**,
Student **Galimullina Ilyuza Ilshatovna**,
Academic Advisor: PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor
Khusnutdinov Rustem Raufovich,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. This paper presents an in-depth comparative analysis of two main types of nuclear reactors: thermal and fast neutron reactors. It explores the fundamental physical differences caused by the neutron spectrum, the characteristics of maintaining a chain reaction, and the key principles of selecting a moderator and coolant. Special attention is given to the impact of these parameters on the efficiency of fission.

Keywords: nuclear reactor, thermal neutrons, fast neutrons, neutron spectrum, moderator, coolant, nuclear fuel, radioactive waste, fast neutron reactor, thermal neutron reactor.

Атомная энергетика – один из ключевых источников энергии. В условиях растущего спроса на электроэнергию и необходимости снижения выбросов углерода и других парниковых газов в атмосферу роль ядерных технологий только возрастает. Однако эффективность, безопасность и ресурсная база ядерной энергетики напрямую зависят от типа используемых реакторов.

Исторически сложилось, что широкое промышленное распространение получили тепловые реакторы (PWR (pressurized water reactor) – водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР), BWR (boiling water reactor) – кипящий водо-водяной реактор), ставшие основой современной атомной отрасли. Они используют хорошо освоенную технологию водяного охлаждения. В то же время реакторы на быстрых нейтронах, несмотря на более сложную конструкцию и высокую стоимость, позволяют вовлечь в топливный цикл уран-238 и реализовать режим расширенного воспроизводства плутония, что увеличивает энергетический потенциал природного урана и решает проблему утилизации радиоактивных отходов. Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью осмысления места каждого типа реакторов в энергетике будущего.

Уран – чрезвычайно эффективный источник энергии. Веществ, способных к делению под действием нейтронов с выделением энергии, всего три – U^{235} , U^{233} , Pu^{239} . В природной смеси содержание U^{235} достигает 0,711 %, U^{238} – 99,283 %, остальное U^{234}). U^{233} и Pu^{239} получают в атомных реакторах облучением нейтронами U^{238} и Th^{232} . Поэтому U^{235} называют первичным ядерным топливом, а U^{233} и Pu^{239} – вторичным.

В процессе деления («сгорания») этих изотопов по реакции U^{235} выделяется колоссальное количество энергии (200 МэВ на 1 акт деления), что примерно в 50 млн раз больше, чем при сгорании ископаемого угля.

В процессе работы реактора концентрация делящихся изотопов снижается не только вследствие деления, но и в результате радиационного захвата ими нейтронов. В результате образуется более тяжелый изотоп при одновременном испускании гамма-квантов. Так при захвате нейтрона образуется U^{236} , не делящийся тепловыми нейтронами.

В реакторах на тепловых нейтронах коэффициент воспроизводства (КВ – отношение количества ядер вновь образовавшегося делящегося материала к количеству ядер израсходованного первичного делящегося материала) зависит от степени обогащения урана: чем выше обогащение, тем он меньше. В реакторах с обогащенным ураном $KB=0.5-0.7$, а с природным – не превышает 0.8 [3].

Однако можно организовать процесс в реакторе таким образом, что КВ будет больше 1. Тогда после завершения кампании реактора масса делящихся материалов в нем окажется больше, чем было загружено. Воспроизводство топлива можно осуществить только в реакторах на быстрых нейтронах. Это объясняется снижением радиационного захвата нейтронов делящимися материалами, увеличением количества нейтронов, испускаемых при делении топлива быстрыми нейтронами, делением на U^{238} и небольшим поглощением быстрых нейтронов материалами конструкций активной зоны, теплоносителем, продуктами деления.

Быстрые реакторы характеризуются существенно более высокой плотностью энерговыделения в активной зоне по сравнению с тепловыми, это позволяет создавать более компактные активные зоны, но предъявляет повышенные требования к теплоотводу.

Ключевое эксплуатационное различие заключается в свойствах теплоносителей. В тепловых реакторах вода выполняет функции и замедлителя, и теплоносителя, работая под высоким давлением для предотвращения вскипания. В

быстрых реакторах используются жидкометаллические теплоносители (натрий, свинец, свинец-висмут), которые не замедляют нейтроны и работают при атмосферном давлении [4]. Однако жидкие металлы химически агрессивны по отношению к конструкционным сталям.

Принципы обеспечения безопасности также различаются. В тепловых реакторах важную роль играет отрицательный паровой коэффициент реактивности: при вскипании теплоносителя-замедлителя цепная реакция замедляется. В быстрых реакторах этот механизм отсутствует.

На сегодняшний день реакторы на тепловых нейтронах составляют абсолютное большинство в мировой ядерной энергетике. Согласно данным Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), в мире эксплуатируется 415 энергетических реакторов общей установленной мощностью около 398 ГВт, при этом ещё 54 блока находятся на стадии строительства [5]. Доминирующее положение занимают легководные реакторы, прежде всего водородные (PWR/ВВЭР) и кипящие (BWR).

Реакторы с водой под давлением (PWR) являются наиболее распространённым типом в мире. Их доля в структуре мирового парка АЭС превышает 60 %. В России этот класс представлен реакторами ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор). Перспективным направлением развития технологии являются проекты поколения III+, такие как российский ВВЭР-ТОИ. 31 декабря 2025 года первый энергоблок с реактором ВВЭР-ТОИ (Курская АЭС-2) был подключён к сети и выдал первые 240 МВт. Этот блок мощностью 1200 МВт стал самым мощным в парке «Росатома» и призван заменить выбывающие мощности РБМК. Согласно планам развития, Россия намерена построить 38 новых энергоблоков, чтобы увеличить долю атомной генерации с текущих 18-20 % до 25 %.

Кипящие реакторы (BWR) являются вторым по распространённости типом легководных реакторов. Их современная эволюция представлена реакторами типа ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) – усовершенствованными кипящими реакторами поколения III. В настоящее время установлены в Японии и Тайване.

В отличие от тепловых реакторов, технологии на быстрых нейтронах находятся на стадии активного развития и демонстрации, мировое лидерство в этой области принадлежит России.

БН-600 и БН-800 (Белоярская АЭС) являются единственными в мире действующими энергоблоками на быстрых нейтронах промышленного масштаба. БН-800, в частности, работает с замкнутым топливным циклом, что позволяет вовлекать в переработку уран-238 и плутоний. В настоящее время «Росатом» приступил к строительству реактора БН-1200М, блока четвёртого поколения на площадке Белоярской АЭС, что станет новым этапом в развитии натриевых быстрых реакторов.

В 2026 году планируется запуск БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем, работающим на смешанном нитридном уран-плутониевом топливе (СНУП). Реактор сможет осуществлять пристанционный замкнутый топливный цикл: отработавшее топливо будет перерабатываться пирохимическим

методом, а полученные делящиеся материалы – повторно использоваться для изготовления свежего топлива.

EAGLES-300 – европейский проект свинцовоохлаждаемого быстрого реактора малой мощности (300 МВт). В 2025 году проект был выбран в числе приоритетных Европейским альянсом по малым модульным реакторам, а также стал первым пилотным проектом в рамках инициативы МАГАТЭ по гармонизации и стандартизации ядерных технологий. Коммерческое развёртывание ожидается к 2039 году после ввода двух демонстрационных реакторов LEANDREA в Бельгии и ALFRED в Румынии [1].

Stellarium – французский проект быстрого реактора-размножителя на расплавах хлоридных солей. В конце 2025 года Stellarium заключила соглашение о предварительном заказе, в рамках которого зарезервировала первую доступную мощность реактора. В январе 2026 года компания подала заявку на разрешение строительства прототипа. Это первая заявка для реакторов на быстрых нейтронах данного типа во Франции [2].

В заключение подчеркнем, что проведенный анализ реакторов на тепловых и быстрых нейтронах позволяет определить их роль в современной и перспективной ядерной энергетике.

С физической точки зрения различия носят фундаментальный характер. Реакторы на тепловых нейтронах, использующие замедлитель, оптимальны для работы на низкообогащенном уране благодаря высокому сечению деления U-235 в тепловой области. Они являются надежным решением для производства электроэнергии «здесь и сейчас». Реакторы на быстрых нейтронах уступают им в компактности активной зоны и предъявляют более жесткие требования к теплоносителям и конструкционным материалам, но открывают доступ к энергии, заключенной в уране-238.

Ключевое преимущество быстрых реакторов раскрывается в топливном цикле. Способность к расширенному воспроизводству топлива (коэффициент воспроизводства более 1) и возможность трансмутации минорных актинидов делают их единственным технологическим решением для реализации замкнутого ядерного цикла. Это позволяет превратить ядерную энергетику из «урановой» в практически самодостаточную, утилизирующую собственные отходы.

С уверенностью можно сказать, что современная стратегия развития атомной отрасли видится не в конкуренции, а в симбиозе двух технологий. Реакторы на тепловых нейтронах будут сохранять доминирующее положение в ближайшие десятилетия, обеспечивая стабильную генерацию. Реакторы на быстрых нейтронах будут выполнять функцию «замыкателей» топливного цикла, нарабатывая топливо и утилизируя отходы. Переход к такой двухкомпонентной системе позволит многократно увеличить ресурсную базу ядерной энергетики, минимизировать объемы радиоактивных отходов и обеспечить энергетическую безопасность для будущих поколений.

Список литературы:

1. EAGLES-300 SMR confirmed as EU priority project // MPS: [сайт]. – URL: <https://www.modernpowersystems.com/news/eagles-300-smr-confirmed-as-eu-priority-project/> (дата обращения: 02.03.2026).
2. SMRs: DAC submitted, Stellaria looks ahead // Sfen: [сайт]. – URL: <https://sfeninenglish.org/stellaria-smr-construction-authorisation-application-dac/> (дата обращения: 02.03.2026).
3. Воспроизводство ядерного топлива. Понятие о коэффициенте воспроизводства и времени удвоения. // Studfiles: [сайт]. – URL: <https://studfile.net/preview/15676242/page:10/> (дата обращения: 02.03.2026).
4. Гончар, Н. И. Оценка относительной скорости дегазации в натриевом теплоносителе реактора на быстрых нейтронах / Н. И. Гончар, Д. В. Дмитриев // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2025. Вып. 1.
5. Установленная мощность АЭС // EES ЕАЕС: [сайт]. – URL: <https://www.eeseaec.org/ustanovlennaa-mosnost-aes> (дата обращения: 02.03.2026).

© Никулина Е. М., Галимуллина И. И., 2026

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ КЛАССИФИКАЦИИ
ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ПО ДАННЫМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

аспирант **Клопов Иван Валерьевич**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент **Котов Владимир Валерьевич**,
Московский государственный технологический университет Станкин,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается задача классификации дефектов сварных соединений как система принятия решений в контуре неразрушающего контроля. Выполнен сравнительный анализ экспертных правил, классических алгоритмов машинного обучения и сверточных нейронных сетей. Представлены количественные результаты сравнения точности методов на основе публикаций последних лет. Предложена иерархическая схема, в которой экспертные признаки, визуальные данные и результаты радиографического или ультразвукового контроля объединяются в единую процедуру классификации.

Ключевые слова: сварные соединения, дефекты, системный анализ, неразрушающий контроль, машинное обучение, сверточная нейронная сеть, классификация, сравнительный анализ, интегральная оценка.

**SYSTEMS ANALYSIS OF ALGORITHMS FOR CLASSIFYING WELDED
JOINT DEFECTS BASED ON NON-DESTRUCTIVE TESTING DATA**

Postgraduate Student **Klopov Ivan Valerievich**,
Academic Advisor: Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Kotov Vladimir Valerievich,
Moscow State Technological University Stankin,
Moscow, Russian Federation

Abstract. The article treats welded-joint defect classification as a decision-making system within non-destructive testing. A comparative analysis of rule-based, classical machine-learning, and convolutional models is performed with quantitative accuracy benchmarks from recent publications. A hierarchical scheme is proposed in which expert features, visual data, and radiographic or ultrasonic results are combined into a unified classification procedure with an integral quality metric.

Keywords: welded joints, defects, systems analysis, non-destructive testing, machine learning, convolutional neural network, classification, comparative analysis, integral assessment.

Качество сварных соединений напрямую определяет надежность металлоконструкций, трубопроводов, сосудов давления и других ответственных объектов. Даже локальный дефект может изменить распределение напряжений, ускорить развитие усталостных трещин и привести к преждевременному отказу

изделия. Поэтому задача контроля сварных швов уже давно перестала быть только технологической и приобрела системный характер: она включает выбор сенсора, формирование набора признаков, классификацию дефекта, оценку риска и выработку управленческого решения [1, с. 115].

Развитие методов машинного зрения и глубокого обучения открыло новые возможности для автоматизации классификации дефектов. Вместе с тем разнообразие подходов – от простых пороговых правил до гибридных нейросетевых архитектур – ставит перед инженером задачу обоснованного выбора. Целью настоящей работы является системный сравнительный анализ алгоритмов классификации дефектов сварных соединений с привлечением количественных данных из современных публикаций [2, с. 125].

Постановка задачи и нормативная основа классификации.

С точки зрения системного анализа классификация дефектов представляет собой отображение множества наблюдаемых признаков $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ в множество классов $y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$. На вход системы могут поступать изображения видимого диапазона, рентгенограммы, данные ультразвукового контроля, а также параметры сварочного процесса. Результат должен быть устойчивым к шуму, изменению освещения, различиям в геометрии шва и неполноте данных [3, с. 10].

В международной практике базой терминологии служит ISO 6520-1, где несовершенства сварки разделяются на шесть крупных групп: трещины, полости, твердые включения, несплавления и непровары, несовершенная форма и размеры, а также прочие несовершенства. Для инженерной интерпретации удобно переходить от нормативных групп к прикладной иерархии признаков: объемные дефекты, линейные и плоскостные, геометрические несоответствия. Такой переход снижает размерность задачи и позволяет строить каскадные алгоритмы.

Системный анализ и сравнение алгоритмов классификации.

Исследование современных публикаций показывает, что наиболее распространены три класса решений. Первый – правила и пороговые процедуры, основанные на экспертных признаках (ширина шва, контур, интенсивность пикселей, форма эхо-импульса). Второй – классические алгоритмы машинного обучения (SVM, деревья решений, случайный лес, k-ближайших соседей). Третий – сверточные нейронные сети (CNN) и гибридные архитектуры [4, с. 25].

Правило-ориентированные схемы обладают высокой интерпретируемостью и работают при малой выборке, однако их точность быстро падает при изменении условий съемки или появлении смешанных дефектов. Сверточные сети дают лучший результат на больших массивах данных, автоматически извлекая иерархические признаки из изображений [5, с. 15].

Для количественного сопоставления подходов в таблице 1 систематизированы результаты из публикаций последних лет. Модель на основе ResNet-50, обученная на наборе RIAWELC, достигла точности 98,75 % при классификации четырех типов рентгенографических дефектов [6, с. 35]. Гибридная связка CNN + Random Forest показала 97,76 % [7, с. 40]. Архитектура DenseNet121 с аугментацией данных продемонстрировала 98,88 % [8, с. 15]. Классические методы SVM и Softmax при использовании признаков, извлеченных CNN, достигли

95,0 % и 94,7 % соответственно [9, с. 9]. Гибридная архитектура CNN-ViT показала 98,56 % точности на рентгенографических снимках [10, с. 14].

Таблица 1. Сравнение точности классификации дефектов сварных соединений

Метод	Входные данные	Набор данных	Точность, %
Экспертные правила	Контуры, яркость	Собственный	75–85
SVM (признаки CNN)	Рентгенограммы	RIAWELC	95,0
Random Forest	Признаки CNN	Собственный	93,2
CNN (ResNet-50)	Рентгенограммы	RIAWELC	98,75
CNN + RF (гибрид)	Фото сварного шва	Собственный	97,76
DenseNet121	Рентгенограммы	RIAWELC	98,88
CNN-ViT (гибрид)	Рентгенограммы	RIAWELC	98,56

Визуализация данных таблицы 1 представлена на рисунке 1, который наглядно демонстрирует преимущество глубоких нейросетевых моделей перед классическими подходами.

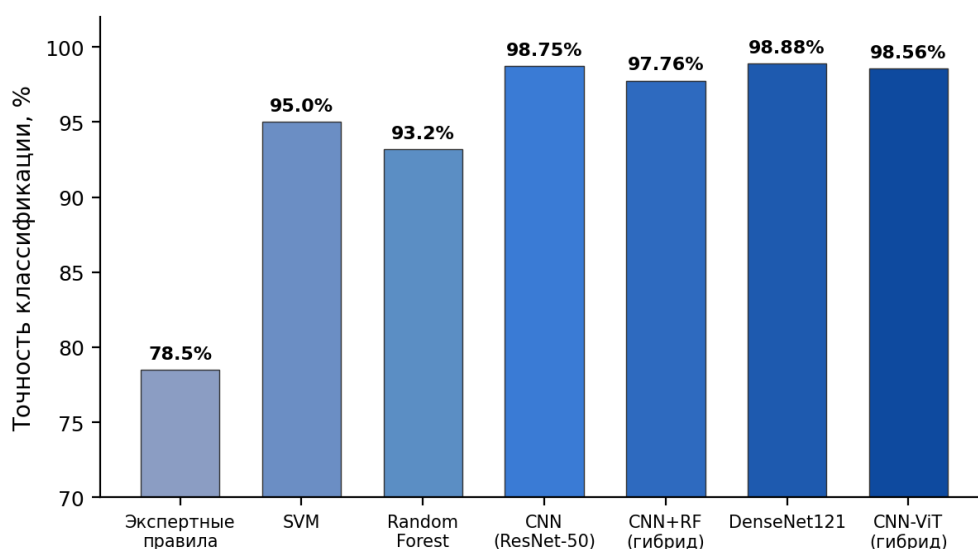


Рисунок 1. Сравнение точности классификации различных алгоритмов

Как видно из рисунка 1, глубокие нейросетевые модели (CNN, DenseNet121, CNN-ViT) обеспечивают точность классификации выше 97 %, тогда как классические методы (SVM, Random Forest), даже при использовании CNN-признаков, ограничиваются диапазоном 93–95 %. Экспертные правила уступают всем остальным подходам, демонстрируя 75–85 %. Это подтверждает целесообразность применения глубокого обучения при наличии достаточного объема размеченных данных.

Многокритериальная оценка алгоритмов

При выборе алгоритма недостаточно анализировать только точность. С позиции системного анализа важны полнота обнаружения, ложноположительные

срабатывания, время обработки, интерпретируемость и стоимость внедрения. Для комплексного сравнения используется интегральный показатель $Q = \sum(w_i \cdot p_i)$, где p_i – нормированные критерии качества по пятибалльной шкале, а w_i – их веса, $\sum w_i = 1$.

На рисунке 2 представлена радарная диаграмма, отражающая экспертные оценки четырех подходов по шести критериям: точность, интерпретируемость, скорость обработки, устойчивость к шуму, работа на малых выборках и масштабируемость. Оценки выставлены по результатам анализа публикаций. Интегральная оценка подходов представлена в таблице 2.

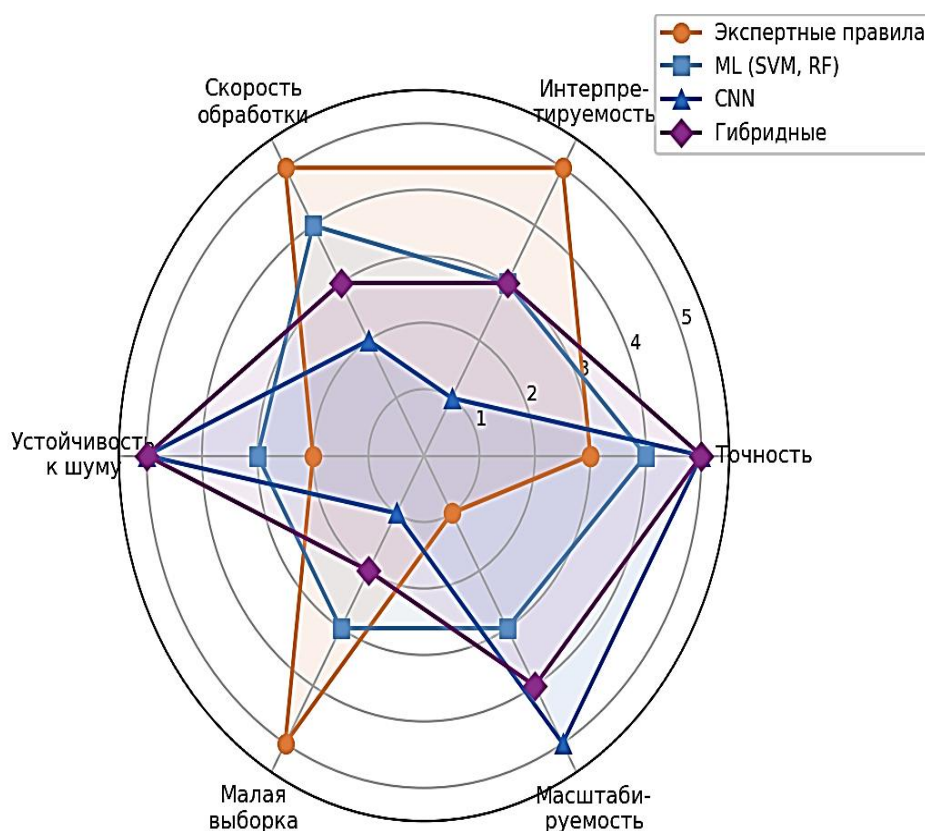


Рисунок 2. Многокритериальное сравнение подходов к классификации дефектов

Таблица 2. Интегральная оценка подходов (веса критериев: точность 0,30; устойчивость к шуму 0,20; интерпретируемость 0,15; скорость 0,15; малая выборка 0,10; масштабируемость 0,10)

Подход	Экспертные правила	ML (SVM, RF)	CNN	Гибридные
Точность (0,30)	3	4	5	5
Устойчивость (0,20)	2	3	5	5
Интерпрет. (0,15)	5	3	1	3
Скорость (0,15)	5	4	2	3
Малая выборка (0,10)	5	3	1	2
Масштаб (0,10)	1	3	5	4
Q (итого)	3,30	3,40	3,50	3,90

Радарная диаграмма наглядно показывает, что ни один из подходов не доминирует по всем критериям одновременно. Экспертные правила лидируют по интерпретируемости и скорости, но проигрывают по точности и масштабируемости. CNN демонстрируют наилучшую точность и устойчивость к шуму, однако требуют значительных вычислительных ресурсов и больших размеченных выборок. Гибридные схемы представляют компромисс, объединяя преимущества обоих подходов.

Расчет интегрального показателя Q подтверждает, что гибридные системы ($Q = 3,90$) являются наиболее сбалансированным решением. CNN занимают второе место ($Q = 3,50$) за счет высокой точности, несмотря на ограничения интерпретируемости и требования к данным.

Предлагаемая иерархическая схема классификации

На основании проведенного сравнительного анализа предлагается иерархическая архитектура классификации. На первом уровне система выполняет локализацию области шва и удаление фоновых помех. На втором уровне выделяются морфологические признаки: точечные, линейные и плоскостные аномалии, а также геометрические несоответствия. На третьем уровне определяется конкретный тип дефекта и его потенциальная опасность. При наличии нескольких каналов измерения результаты визуального, радиографического и ультразвукового контроля объединяются методом позднего слияния. Схема представлена на рисунке 3.

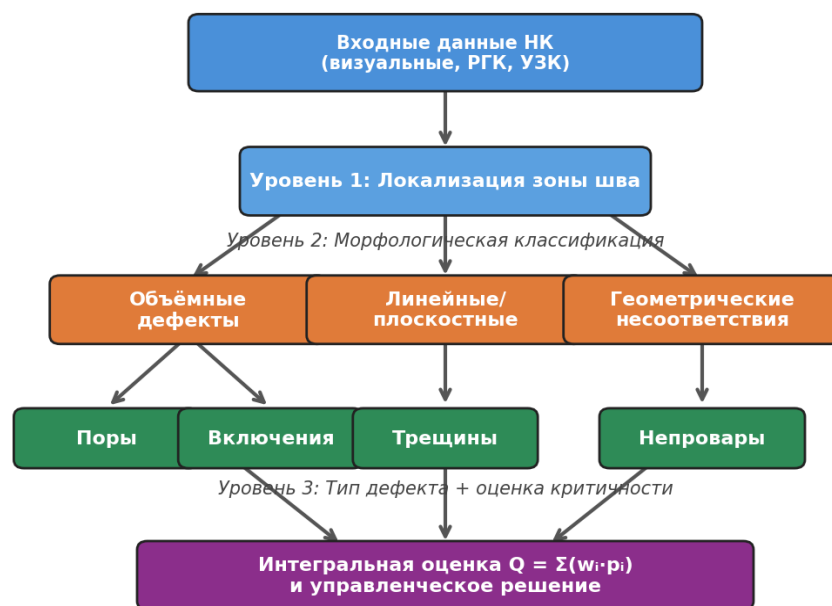


Рисунок 3. Иерархическая схема классификации дефектов сварных соединений

Практическое преимущество иерархии заключается в том, что ошибка на раннем этапе не разрушает всю цепочку решения. Если модуль локализации не уверен, изображение передается на повторную проверку. Если объект уверенно отнесен к классу объемных дефектов, а затем уточнен как пористость или включение, система формирует обоснованное предупреждение для технолога. Именно такое разделение уровней соответствует логике системного анализа, где каждая подсистема решает собственную задачу.

Обсуждение результатов

Сопоставление публикаций показывает, что для поверхностных дефектов наибольший потенциал имеют методы машинного зрения и CNN, а для внутренней дефектоскопии – ультразвуковые методы, дополняемые алгоритмами машинного обучения. Универсального алгоритма, одинаково хорошо работающего на всех типах сварных соединений, в настоящее время нет. Выбор архитектуры зависит от физической природы сигнала, характера дефекта, доступности размеченных данных и требований к скорости принятия решения.

Проведенный количественный анализ позволяет сформулировать практические рекомендации. Для задач с ограниченной статистикой (менее 500 образцов) оправданно комбинировать экспертные правила и классические модели. Для больших архивов изображений (более 5000 образцов) целесообразны сверточные сети, обеспечивающие точность выше 97 %. Для ответственных промышленных линий перспективны гибридные мультимодальные системы, получившие наивысший интегральный показатель $Q = 3,90$ в нашей оценке.

Современные исследования указывают на перспективность облегченных моделей (MobileNet, EfficientNet), трансформерных архитектур (ViT) и мультимодальной интеграции нескольких каналов данных. Однако для широкого промышленного внедрения необходимы открытые размеченные наборы данных, единые критерии валидации и тестирования в реальных производственных условиях.

Системный анализ показывает, что классификация дефектов сварных соединений должна рассматриваться как многоуровневая задача, включающая нормирование классов, обработку сигналов, выделение признаков и принятие решения с учетом риска. Сравнительный анализ семи методов на основе данных из современных публикаций подтвердил, что глубокие нейросетевые модели обеспечивают точность 97–99 %, существенно превышая экспертные правила (75–85 %) и классические ML-методы (93–95 %). При этом многокритериальная интегральная оценка показала преимущество гибридных систем ($Q = 3,90$), объединяющих экспертные правила, методы машинного обучения и CNN. Предложена иерархическая архитектура классификации, обеспечивающая устойчивость, интерпретируемость и адаптивность к различным видам неразрушающего контроля.

Список литературы:

1. Емельянова, М. Г. Обнаружение поверхностных дефектов сварных соединений при визуальном контроле методами машинного зрения / М. Г. Емельянова, С. С. Смаилова, О. Е. Бакланова // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 1. – С. 112–117. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1137.
2. Sun, H. Machine learning for ultrasonic nondestructive examination of welding defects: A systematic review / H. Sun, P. Ramuhalli, R. E. Jacob // Ultrasonics. – 2023. – Vol. 127. – 106854. – DOI: 10.1016/j.ultras.2022.106854.
3. Palma-Ramírez, D. Deep convolutional neural network for weld defect classification in radiographic images / D. Palma-Ramírez, B. D. Ross-Veitia, P. Font-Arriosa et al. // Heliyon. – 2024. – Vol. 10. – e30590. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e30590.

4. Гаврилов, А. И. Классификация дефектов сварки на основе сверточной нейронной сети / А. И. Гаврилов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2021. – № 2(135). – С. 23-36. – DOI: 10.18698/0236-3933-2021-2-23-36.
5. ISO 6520-1:2007. Welding and allied processes – Classification of geometric imperfections in metallic materials – Part 1: Fusion welding. – Geneva: ISO, 2007.
6. Герасимов, В. М. Виды и методы неразрушающего контроля качества сварных соединений / В. М. Герасимов // Наука без границ. – 2019. – № 12(40). – С. 34-39.
7. Пашков, Ю. И. Разработка классификатора дефектов для сварных труб / Ю. И. Пашков, В. А. Лупин, М. А. Иванов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2012. – Вып. 18, № 15. – С. 37-40.
8. Arunkumar, G. Explainable deep learning approaches for classifying welding defects – integrating CNN architectures with XAI / G. Arunkumar et al. // International Journal on Interactive Design and Manufacturing. – 2025. – DOI: 10.1007/s12008-025-02478-1.
9. Yang, H. Deep learning-based classification of weld surface defects / H. Yang, J. Gao, W. Zhao et al. // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9, № 16. – 3312. – DOI: 10.3390/app9163312.
10. Totino, B. A misclassification-aware explainable hybrid CNN-vision transformer framework for radiographic weld inspection / B. Totino et al. // Scientific Reports. – 2026. – DOI: 10.1038/s41598-026-44874-x.

Примечание. При написании статьи были применены технологии искусственного интеллекта.

© Клопов И. В., 2026

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗА ПОСЛЕ ДКС В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

канд. техн. наук, доцент **Гаркуша Наталия Валентиновна**,
Саратовский филиал ПривГУПС,
г. Саратов, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена решению актуальной задачи поддержания требуемой температуры газа на выходе установок промышленной подготовки газа в условиях изменения климата на Крайнем Севере. На примере Ямало-Ненецкого автономного округа показано, что участвовавшие периоды аномально высоких температур приводят к превышению проектных параметров. Предложена методика доохлаждения газа путем орошения аппаратов воздушного охлаждения дожимных компрессорных станций для достижения требуемых температурных значений.

Ключевые слова: установка комплексной подготовки газа, добыча газа, температура окружающей среды, аппарат воздушного охлаждения, дожимная компрессорная станция.

TECHNOLOGICAL SOLUTIONS TO COMPENSATE FOR THE EFFECT OF HIGH ENVIRONMENTAL TEMPERATURES ON GAS COOLING AFTER BCS IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE

PhD in Engineering, Associate Professor
Natalia Valentinovna Garkusha,
Saratov branch of Volga State Transport University Branch,
Saratov, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to solving the urgent problem of maintaining the required gas temperature at the outlet of field gas treatment plants in the face of climate change in the Far North. Using the example of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, it is shown that frequent periods of abnormally high temperatures lead to exceeding the design parameters. A method of gas re-cooling by irrigation of air-cooling units of booster compressor stations is proposed to achieve the required temperature values.

Keywords: complex gas treatment plant, gas production, ambient temperature, air-cooling unit, booster compressor station.

Климатическое состояние планеты в настоящий момент представляется нестабильным. Все чаще и чаще регистрируются температурные рекорды в различных климатических зонах, происходит изменение климата. Как эти изменения сказываются на процессах добычи полезных ископаемых, в частности, на добыче природного газа, где технологический процесс подготовки напрямую связан с характеристиками окружающей среды? Что происходит на газовых

промыслах, которые введены в эксплуатацию десятки лет назад и процессы запроектированы без учета аномальных характеристик окружающей среды?

Около 80-90 % всей добычи природного газа в РФ производится в Ямало-Ненецком автономном округе. Наиболее крупными являются Уренгойское, Бованенковское, Заполярное, Ямбургское месторождения. Проекты разработки этих газовых промыслов были выполнены в конце XX – начале XXI вв.

Природный газ, добываемый на газовых месторождениях, имеет сложный состав. Помимо компонентов алканового ряда, в газовом потоке содержится твердые частицы породы, минерализованная вода. Подготовка газа к транспорту включает в себя очистку газа от примесей, влаги и выделение целевых компонентов, приведение его характеристик в соответствие с нормативными показателями. Основным показателем качества первичной подготовки газа, установленным СТО Газпром 089-2010, является точка росы [1]. Достижение нормативных показателей точки росы транспортируемого газа на месторождениях Западной Сибири достигается, в основном, применением методов сорбции и низкотемпературной сепарации.

Абсорбционный способ осушки газа осуществляется на жидком абсорбенте, который поглощает влагу и нежелательные компоненты из газовой смеси. Процесс происходит в колонне-абсорбере, где газ и абсорбент, чаще всего гликоли – диэтиленгликоль (ДЭГ) или триэтиленгликоль (ТЭГ), контактируют противотоком [2, 3]. Насыщенный абсорбент затем регенерируют и возвращают в цикл, а осушенный газ направляют в магистральный трубопровод. Для данного метода характерна невысокая потеря давления в процессе промышленной подготовки. При низкотемпературной сепарации (НТС) газ охлаждают до низких температур, чтобы сконденсировать и удалить из него влагу и тяжёлые углеводороды. Охлаждение, обычно, достигается за счёт эффекта Джоуля-Томсона при дросселировании газа под давлением [2, 3]. После охлаждения смесь поступает в сепаратор, где жидкие фракции конденсат и водный раствор ингибитора, отделяются от осушенного газа. Затем подготовленный газ направляют в магистральный трубопровод, а извлечённый конденсат – на дальнейшую переработку. Дроссель-эффект, необходимый для глубокой осушки газа, достигается при перепаде давления до 5,0-5,5 МПа. [4, стр. 309]. Для обеспечения давления входа в магистральный газопровод используют дожимные компрессорные станции (ДКС).

Со временем давление в газоносном пласте падает и давление газа на входе в установку комплексной подготовки газа (УКПГ) становится ниже, чем давление, требуемое на входе в магистральный газопровод, даже без учета потери давления в процессе его подготовки. Для повышения давления газа в эксплуатацию вводятся дожимные компрессоры (ДК). Компримирование газа может осуществляться как до процесса осушки, так и после. Одновременно с повышением давления в компрессорах происходит повышение температуры газа, что влечет за собой необходимость его охлаждения. При степени сжатия 1,7 перепад температур составляет около 45°C, а при 3,0 – около 140°C. Охлаждение газа происходит в аппаратах воздушного охлаждения (АВО), расположенных на открытых площадках, посредством конвективного теплообмена с окружающим воздухом. При расчете типа АВО и их количества в условиях получения требуемой температуры

охлаждаемого продукта учитываются климатические данные района газового промысла, в том числе экстремальные значения, в наиболее жаркий период года в данной местности. При этом рекомендуется выбирать в качестве расчетной среднюю температуру сухого воздуха в 13 часов дня наиболее жаркого месяца в году [5].

Для расчета количества АВО, требуемого для охлаждения газа, используют основное уравнение теплопередачи [4, 5, 6]:

$$Q = r_o * \frac{V}{24 * 3600} * C_p * (t_1 - t_2),$$

где Q – тепло, участвующее в теплообмене, Вт;

r_o – плотность перекачиваемого газа, кг/м³;

V – среднесуточная производительность установки, м³/сут;

C_p – теплоемкость газа, Дж/кг*°С;

t_1 – температура на выходе ДКС до АВО газа, °С

t_2 – температура на выходе ДКС после АВО газа, °С

Для нахождения поверхность теплообмена выводят из уравнения теплопередачи, которое служит для определения требуемой поверхности, рассчитывают по формуле:

$$Q_{\text{АВО}} = K * F * \theta_m,$$

где K – коэффициент теплопередачи, кВт/(м²·К);

F – поверхность теплообмена, м²;

θ_m – среднелогарифмическая разность температур, °С.

Среднелогарифмическая разность находят по формуле:

$$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln(\theta_1/\theta_2)} * \varepsilon_t,$$

где ε_t – поправочный коэффициент, который зависит от схемы движения теплоносителей,

а θ_1 и θ_2 для АВО рассчитывают по формулам:

$$\theta_1 = t_1 - T_2;$$

$$\theta_2 = t_2 - T_1;$$

где T_1 – температура наружного воздуха, °С,

T_2 – температура воздуха за АВО, °С,

В основе тепловой эффективности запроектированных АВО лежат климатические данные района промысла. Средняя максимальная температура воздуха наиболее теплого месяца в районе основной добычи газа Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО), согласно строительной климатологии СП 131.13330.2020, представлена в таблице 1 [7].

Таблица 1. Климатические параметры теплого периода года

Населенный пункт	Средняя максимальная температура воздуха наиболее теплого месяца, °С
Надым	20,4
Тарко-Сале	21,8
Уренгой	20,9

Однако в летние месяцы в 2021, 2022, 2023 году в Ямало-Ненецком автономном округе были зафиксированы рекордно высокие температуры атмосферного воздуха (таблица 2) [8].

Таблица 2. Рекордные показатели температуры воздуха, зафиксированные в 2021-2023 гг. в городах ЯНАО

Дата	Максимальная температура воздуха наиболее теплого месяца, °С	Средняя температура воздуха наиболее теплого месяца, °С
Надым		
20.07.2021	26,8	20,7
28.07.2022	25,3	19,1
29.07.2022	28,3	17,1
17.07.2023	28,7	20,6
18.07.2023	24,3	19,4
19.07.2023	29,2	22,6
20.07.2023	30,0	24,2
21.07.2023	28,4	23,3
22.07.2023	27,1	20,8
23.07.2023	27,6	21,3
24.07.2023	27,7	21,8
25.07.2023	28,5	23,7
26.07.2023	26,4	20,4
27.07.2023	26,8	21,6
28.07.2023	26,5	22,1
Тарко-Сале		
23.07.2021	29,1	23,3
29.07.2022	27,2	25,2
30.07.2022	27,7	23,0
18.07.2023	24,6	22,6
19.07.2023	29,4	21,2

21.07.2023	29,0	21,1
22.07.2023	28,4	23,8
23.07.2023	26,8	24,6
24.07.2023	28,5	19,9
26.07.2023	27,4	19,6
28.07.2023	26,6	23,3
29.07.2023	23,4	20,8
Уренгой		
21.07.2021	25,7	19,6
29.07.2022	27,0	23,3
30.07.2022	25,6	18,7
17.07.2023	25,3	19,2
18.07.2023	23,1	20,7
19.07.2023	28,7	26,2
20.07.2023	29,7	26,6
22.07.2023	26,9	23,3
23.07.2023	28,2	26,1
24.07.2023	27,5	25,6
25.07.2023	28,1	26,0
26.07.2023	29,5	25,8
27.07.2023	28,9	24,9
28.07.2023	27,5	23,3
29.07.2023	24,0	21,2

Повышение температуры окружающей среды отрицательно сказывается как на процессе осушки, так и на технологии НТС. Основным критерием подготовки газа является его качество, т. е. температура точки росы, необеспечение которого может привести к многомиллионным убыткам. При превышении температурных показателей, по сравнению с регламентными, для достижения точки росы увеличивалось время контакта газа с абсорбентом путем снижения добычи газа, а также за счет увеличения расхода абсорбента. Что, в свою очередь, так же негативно сказывается на выполнении плановых поставок газа в Единую газотранспортную систему и прибыль предприятия.

Кроме того, параметры газа при выходе из УКПГ определяются условиями в магистральном газопроводе, куда поступает подготовленный к транспорту газ. В условиях прокладки магистральных трубопроводов в вечномёрзлых грунтах температура газа должна поддерживаться на уровне $0...-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ [9].

В данной работе предлагается дополнительное охлаждение газа путем мелкодисперсного орошения поверхностей теплообмена АВО ДКС холодной водой. Вода подается на АВО через разбрызгивающие форсунки и обеспечивает дополнительное охлаждение газа за счёт энергоёмкого фазового перехода воды в процессе ее испарения.

Понижение температуры жидкости при испарении массы m определяется из уравнения теплового баланса:

$$\lambda * m = c * M * \Delta T,$$

где:

λ – удельная скрытая теплота парообразования жидкости, Дж/кг;

m – масса испарившейся жидкости, кг;

c – удельная теплоёмкость жидкости, Дж/(кг*К);

M – общая масса охлаждаемого вещества, кг;

ΔT – разность температур, °С.

Массу испарившейся жидкости m рассчитывают через интенсивность испарения:

$$m = W * S * \tau,$$

где:

W – интенсивность испарения, кг/(м²*с);

S – площадь поверхности испарения, м²;

τ – время испарения, с.

Интенсивность испарения W находят по формуле Дальтона:

$$W = K * (E - e),$$

где:

K – коэффициент пропорциональности (зависит от скорости ветра, свойств жидкости), кг/(м²*с*Па);

E – давление насыщенного водяного пара при температуре испаряющейся жидкости, Па;

e – фактическое парциальное давление водяного пара в окружающем воздухе, Па.

Таким образом, предлагаемый расчёт количества воды для орошения АВО в условиях продолжительного превышения температуры окружающей среды над значениями, заложенными в материально-тепловой баланс установки при проектировании месторождений позволяет:

- определить необходимый расход воды на орошение;
- обеспечить доохлаждение газа до требуемых температурных значений;
- компенсировать негативное влияние высоких температур окружающей среды на эффективность работы АВО.

Список литературы:

1. СТО Газпром 089-2010 «Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам. Технические условия». – М.: ОАО «Газпром», 2010. – 19 с.
2. Бекиров, Т. М. Сбор и подготовка к транспорту природных газов / Т. М. Бекиров, А. Т. Шаталов. – М.: Недра, 1986.
3. Китов, Е. С. Анализ технологий промышленной подготовки природного газа / Е. С. Китов, В. И. Ерофеев, С. Н. Джалилова. – Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 10. – С. 31-38. – DOI 10.18799/24131830/2022/10/3885 URL [elibrary_49721697_32761971.pdf](https://elibrary.ru/49721697_32761971.pdf) (дата обращения: 11.03.2026).

4. Бекиров, Т. М. Технология обработки газа и конденсата / Бекиров Т. М., Г. А. Ланчаков. – М.: Недра, 1999.
5. Методика теплового и аэродинамического расчёта аппаратов воздушного охлаждения. – М.: ВНИИнефтемаш, 1981.
6. Кириллин, В. А. Техническая термодинамика: учебник для вузов / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – М.: Издательский дом «МЭИ», 2016.
7. СП 131.13330.2020. Свод правил. Строительная климатология. СНиП 23-01-99 (утв. и введён в действие Приказом Минстроя России от 24.12.2020 № 859/пр).
8. Погодный сервис [Электронный ресурс]. – URL: https://pogoda-service.ru/archive_gsod.php (дата обращения: 25.02.2026).
9. Шпотаковский, М. М. Тепловые режимы магистральных газопроводов / М. М. Шпотаковский. – М.: Издательство РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2004.

© Гаркуша Н. В., 2026

ВЛИЯНИЕ БЛОКИРОВКИ ОРМУЗСКОГО ПРОЛИВА НА ПЕРЕБОЙ В ГЛОБАЛЬНЫХ ЦЕПОЧКАХ ПОСТАВОК

студент **Высотина Елена Романовна**,
студент **Прокудина Елена Александровна**,
науч. руководитель: канд. экон. наук, доцент **Сысоева Ольга Владимировна**,
Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается влияние блокировки Ормузского пролива на устойчивость глобальных цепочек поставок. Проанализированы объемы транспортировки нефти, конденсата и нефтепродуктов за период 2020 – первый квартал 2025 года, а также выявлены ключевые экспортеры и импортеры энергоресурсов. Рассмотрена динамика конфликта США, Израиля и Ирана, который привел к остановке судоходства в проливе.

Ключевые слова: Ирано-израильский конфликт, энергетические рынки, геополитическая напряженность, логистические риски, волатильность цен на нефть, экспорт нефти и газа.

THE IMPACT OF THE STRAIT OF HORMUZ LOCKDOWN ON DISRUPTIONS IN GLOBAL SUPPLY CHAINS

Student **Vysotina Elena Romanovna**,
Student **Prokudina Elena Aleksandrovna**,
Academic Advisor: PhD in Economics, Associate Professor **Sysoeva Olga Vladimirovna**,
Plekhanov Russian University of Economics,
Moscow, Russian Federation

Abstract. The article examines the impact of the Strait of Hormuz lockdown on the sustainability of global supply chains. The volume of transportation of oil, condensate and petroleum products for the period 2020 – Q1 2025 has been analyzed, and key exporters and importers of energy resources have been identified. The dynamics of the conflict between the United States, Israel and Iran, which led to the shutdown of shipping in the Strait, is considered.

Keywords: Iran-Israel conflict, energy markets, geopolitical tensions, logistical risks, oil price volatility, oil and gas exports.

Ормузский пролив – единственный морской путь, который обеспечивает выход из Персидского залива в Индийский океан. В узких местах он перекрывается 12-мильными территориальными зонами Ирана и Омана (по 22 км каждая), его акватория поделена между ними по срединной линии (по договору о границе от 1974 года). Чтобы пересечь пролив, суда проходят через территориальные воды

этих стран. В соответствии с Конвенцией ООН по морскому праву, пролив считается международным, поскольку это единственный путь к открытому морю [1].

Каждый день через Ормузский пролив проходит порядка 20 миллионов барр. (баррелей) нефти из Саудовской Аравии, ОАЭ (Объединенных Арабских Эмиратов), Ирака и Катара (рисунок 1) [2]. Главный поток идет через Азию: Китай получает треть своей нефти через пролив. Европа, в свою очередь, напрямую зависит от катарского СПГ (сжиженного природного газа), часть которого переправляется через пролив.

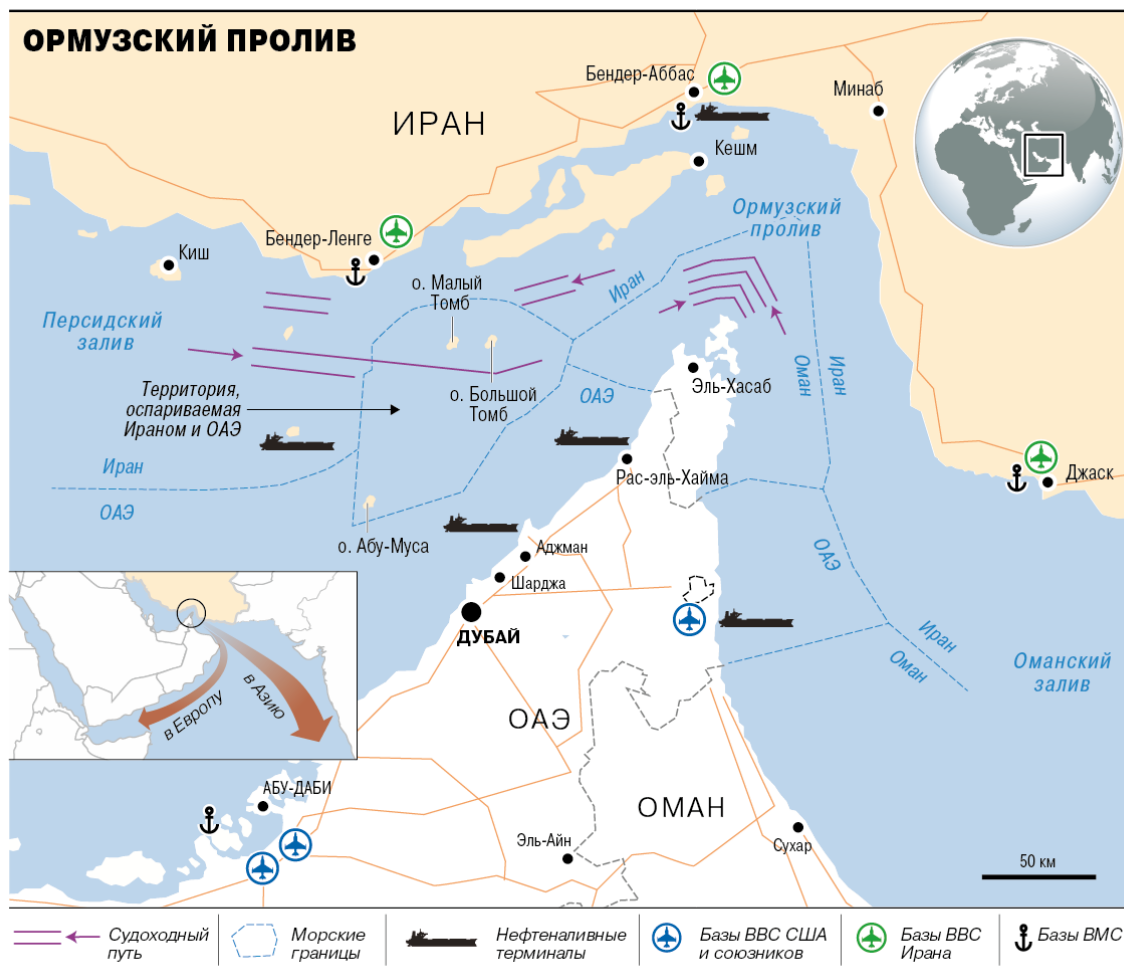


Рисунок 1. Ормузский пролив

Рассмотрим объем транспортировки сырой нефти, конденсата и нефтепродуктов через Ормузский пролив (таблица 1) [2].

Таблица 1. Объем транспортировки сырой нефти, конденсата и нефтепродуктов через Ормузский пролив, 2020 – 1-й квартал 2025 года (млн барр. в сутки)

Показатель	2020	2021	2022	2023	2024	1K25
Общий объем поставок нефти через Ормузский пролив	19,1	19,4	21,4	21,4	20,3	20,1
Сырая нефть и конденсат	14,3	14,4	16,0	15,5	14,3	14,2
Нефтепродукты	4,8	5,0	5,5	5,8	5,9	5,9

По данным таблицы 1 видно, что поток нефти через Ормузский пролив в целом остается высоким. Значительное увеличение произошло в 2022 году: общий объем достиг 21,4 млн барр. в сутки. В 2024 и 2025 годах наблюдается спад за счет снижения сырой нефти и конденсата на 1,2 и 0,1 млн барр. в сутки соответственно. Стоит отметить, что в первом квартале 2025 года (даже после спада) объем перевозок нефти по Ормузскому проливу составлял 14,2 млн барр. в сутки – около четверти всей морской торговли нефтью.

В первом квартале 2025 года главными экспортерами нефти являются Саудовская Аравия (5,29 млн барр. в сутки), Ирак (3,24 млн барр. в сутки) и ОАЭ (1,83 млн барр. в сутки). Главные импортеры нефти через Ормузский пролив – Китай (5,35 млн барр. в сутки), Индия (2,08 млн барр. в сутки) и Южная Корея (1,70 млн барр. в сутки).

С конца февраля 2026 года Ормузский пролив оказался в центре серьезного кризиса. 28 февраля 2026 года США (Соединенные Штаты Америки) совместно с Израилем нанесли удары по Ирану, в результате которых погиб лидер Ирана – Али Хаменеи.

Ответ Ирана не заставил долго ждать и был совершен путем атаки американских баз, территории Израиля и ряда стран Персидского залива с использованием ракет и беспилотников. В этот же период Корпус стражей исламской революции вынес предупреждение о том, что проход через Ормузский пролив небезопасен, что остановило судоходство.

К 12 марта 2026 года ситуация стала ухудшаться: было зафиксировано 21 нападение на торговые суда. Из-за угроз атак морской трафик снизился на 70 %, вскоре движение вовсе прекратилось.

Конфликт зарождался задолго до февраля 2026 года: переговоры по ядерной программе Ирана ни к чему не привели, а в 2025 произошел короткий воздушный конфликт. Страны-экспортеры готовились к этому кризису: Иран резко увеличил экспорт нефти и сократил свои запасы с целью снижения рисков. Саудовская Аравия последовала данному примеру.

Напряжение отразилось и на страховом рынке: за пару дней до ударов стоимость страховки судов от военных рисков заметно возросла. Если обычно страховка стоит 0,25 % от суммы, покрывающей стоимость судна, теперь она достигает 3 % от этой суммы [3].

28 февраля США и Израиль провели операцию «Эпическая ярость». Целями США были военные и ядерные объекты Ирана, а также влияние на руководство страны.

Ответ Ирана включал обстрелы городов Израиля и американских баз, расположенных в странах Персидского залива, таких как ОАЭ, Катар и Бахрейн. Проведенная операция повлекла за собой жертвы среди населения и разрушения инфраструктуры. Конфликт вышел за пределы двух стран, и в него включилась группировка Хезболла, начав обстрелы Израиля.

К 9 марта ситуация стала еще более напряженной: страховые ставки выросли в несколько раз, а власти США начали рассматривать меры поддержки страховых компаний [4].

Блокировка Ормузского пролива значительно отражается на мировой экономике. В первую очередь, удар пришелся по энергетическому сектору. Через

пролив проходит значительная доля мировой нефти и сжиженного газа, поэтому снижение транзита вызвало значительный рост цен. Удорожание энергии автоматически влечет за собой рост себестоимости абсолютно любой продукции (от продуктов питания до металлов). Энергия является основой всех производственных процессов, ее удорожание запускает цепную реакцию по всей экономике.

Последствия блокировки Ормузского пролива связаны не только с ценами, но и с доступностью ресурсов. Блокировка ограничила поставки химического сырья и удобрений из стран Персидского залива. Поскольку производство удобрений полностью зависит от природного газа, ситуация усугубляется двойным эффектом: с одной стороны, дорожает газ, с другой стороны, снижаются объемы поставок удобрений. Таким образом, аграрный сектор сталкивается и с ростом цен, и с риском нехватки ключевых компонентов.

Промышленность также оказалась под давлением. Ограничения на вывоз алюминия и сырья для его производства приводят к тому, что металл накапливается в странах-производителях и не доходит до потребителей. При этом спрос остается достаточно высоким, особенно со стороны автомобилестроения, авиационной и строительной отраслей. Возникает парадокс: ресурсы есть, но из-за проблем логистики они недоступны. Это усиливает волатильность цен и вынуждает компании перестраивать цепочки поставок (часто со снижением эффективности и ростом затрат).

Особенно блокировку пролива почувствовал высокотехнологический сектор. Прекращение поставок гелия, который является важным компонентом для производства микрочипов, медицинского оборудования и телекоммуникаций создало риски системного дефицита. Этот ресурс сложно заместить: его роль в технологических процессах критична. Прекращение поставок гелия может замедлить производство электроники и развитие цифровой инфраструктуры [5].

Также произошли нарушения логистики: закрытие морских путей и ограничение воздушного сообщения между Европой и Азией нарушают привычные цепочки поставок. Судоходные компании вынуждены направлять грузы в обход, например, через мыс Доброй Надежды, что увеличивает сроки доставки и повышает стоимость фрахта. Стоимость бункеровочного топлива выросла более чем на 35 %, что сделает перевозки ещё дороже. В результате компании сталкиваются не только с перебоями, но и с необходимостью пересматривать всю логистику.

Перечисленные проблемы создают единый эффект: сначала дорожают энергоносители, затем растут издержки производства, после чего возникают дефициты сырья и компонентов. Это приводит к перебоям в поставках готовой продукции и дальнейшему росту цен. В такой ситуации глобальные цепочки поставок теряют устойчивость и становятся более дорогими.

В долгосрочной перспективе ограничения в связи с блокировкой Ормузского пролива могут привести к глубоким структурным изменениям. Компании будут вынуждены искать альтернативные маршруты поставок, увеличивать запасы и переносить производство ближе к рынкам сбыта, однако такие изменения требуют значительных затрат по времени и инвестиций. Значит, в ближайшее время мировая экономика будет оставаться нестабильной.

Таким образом, блокировка Ормузского пролива демонстрирует тесную связь между глобальными цепочками поставок. Нарушение одного коридора поставок запускает комплекс проблем, которые затрагивают различные области экономики.

Список литературы:

1. Ормузский пролив: значение, контроль и роль Ирана. – Текст: электронный // Информационное агентство «РБК». – URL: https://www.rbc.ru/base/16/06/2025/685020189a794776d3baab28?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F#contents-5 (дата обращения: 22.03.2026).
2. На фоне регионального конфликта Ормузский пролив остается важнейшим нефтяным узлом – Текст: электронный // Управление энергетической информации США. – URL: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=65504> (дата обращения: 22.03.2026).
3. FT: страховка судов в Ормузском проливе подорожала в 12 раз. – Текст: электронный // Коммерсантъ. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/8480230> (дата обращения: 22.03.2026).
4. Как перекрытие Ормузского пролива скажется на мировой экономике: объясняют экономисты. – Текст: электронный // Федерал Пресс. – URL: <https://fedpress.ru/article/3427953> (дата обращения: 22.03.2026).
5. Масштабный шок еще впереди: как война на Ближнем Востоке разрушает глобальную экономику. – Текст: электронный // ТАСС. – URL: <https://tass.ru/ekonomika/26753231> (дата обращения: 22.03.2026).

© Высотина Е. Р., Прокудина Е. А., 2026

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ДИСПЕТЧЕРСКИХ ЦЕНТРАХ: АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

студент **Каштелян Григорий Дмитриевич**,
науч. руководитель: ассистент **Никешин Владислав Геннадьевич**,
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий
и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается роль технологий искусственного интеллекта (ИИ) в автоматизации процессов управления современными энергосистемами. Проводится анализ применения методов машинного обучения для прогнозирования параметров электроэнергетических режимов и предиктивной аналитики состояния оборудования. Особое внимание уделяется концепции автоматического противоаварийного управления и сравнению эффективности ИИ с традиционными SCADA-системами. Сделан вывод о том, что внедрение ИИ является необходимым этапом цифровой трансформации отрасли для обеспечения надежности и энергоэффективности.

Ключевые слова: искусственный интеллект, энергосистема, автоматизация, диспетчерское управление, предиктивная аналитика, противоаварийная автоматика, SCADA.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN CONTROL CENTERS: AUTOMATION OF DECISION-MAKING IN POWER SYSTEMS

Student **Kashtelyan Grigorii Dmitrievich**,
Academic Advisor: Assistant Lecturer **Nikeshin Vladislav Gennadievich**,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article examines the role of artificial intelligence (AI) technologies in automating the management processes of modern power systems. The analysis of the application of machine learning methods for forecasting parameters of electric power modes and predictive analytics of equipment condition is carried out. Special attention is paid to the concept of automatic emergency control and comparison of AI efficiency with traditional SCADA systems. It is concluded that the introduction of AI is a necessary stage of the digital transformation of the industry to ensure reliability and energy efficiency.

Keywords: artificial intelligence, power system, automation, dispatching control, predictive analytics, emergency control, SCADA.

Традиционные системы диспетчерского управления (SCADA/АСУ ТП), построенные на жесткой логике и математических моделях, демонстрируют высокую

эффективность в штатных режимах. Однако современные вызовы, такие как массовое внедрение распределенной генерации (ВИЭ), волатильность спроса со стороны «просьюмеров» и рост числа кибератак, требуют перехода к новому уровню автоматизации. В связи с этим все более актуальным становится внедрение систем поддержки принятия решений на основе искусственного интеллекта [1, с. 45].

Ключевое отличие интеллектуальных систем от традиционной автоматики заключается в способности обучаться на данных и адаптироваться к новым, заранее непредусмотренным сценариям. Если классические SCADA-системы работают по принципу жестко заданных алгоритмов (if-then), то системы на основе ИИ способны выявлять скрытые закономерности, прогнозировать развитие событий и предлагать оптимальные управляющие воздействия в режиме реального времени. Это особенно важно в условиях, когда количество контролируемых параметров исчисляется миллионами, а время принятия решений сокращается до миллисекунд. Кроме того, ИИ-системы способны непрерывно совершенствоваться по мере накопления данных, в то время как традиционная автоматика требует ручного обновления алгоритмов при изменении конфигурации сети или появлении новых типов оборудования [2, с. 55].

Одним из ключевых направлений применения ИИ в энергетике является предиктивная аналитика. В отличие от традиционной системы планово-предупредительных ремонтов (ППР), которая зачастую приводит либо к недогрузке персонала, либо к авариям из-за человеческого фактора, нейросетевые алгоритмы позволяют анализировать термографические данные, вибрацию и токи утечки в реальном времени. Как отмечается в исследовании [3], применение методов машинного обучения (например, Random Forest или LSTM-сетей) для прогнозирования остаточного ресурса силовых трансформаторов позволяет снизить операционные затраты (ОРЕХ) на 15–20 % и предотвратить до 70 % аварийных отказов.

Опыт российских энергетических компаний подтверждает эффективность данного подхода. В Концерне «Росэнергоатом» (Электроэнергетический дивизион Госкорпорации «Росатом») система предиктивной аналитики внедрена на нескольких атомных станциях. На энергоблоке № 4 Белоярской АЭС с реактором БН-800 система введена в промышленную эксплуатацию в ноябре 2025 года [4]. Разработанная АО «ВНИИАЭС» система анализирует данные с нескольких тысяч датчиков в режиме реального времени, выявляет отклонения от нормальной работы оборудования и оценивает запас времени до выхода параметров за безопасные пределы. В обычных режимах система анализирует текущее состояние каждые пять минут, а на переходных режимах, во время пуска или останова, параметры могут анализироваться каждую секунду [5]. Ранее аналогичные решения были успешно внедрены на Нововоронежской АЭС-2 (энергоблоки № 1 и № 2) и Ленинградской АЭС-2 [4].

Особый интерес представляет автоматизация противоаварийного управления. В современных энергосистемах время реакции на аварийное возмущение (короткое замыкание, отклонение частоты) исчисляется миллисекундами. Человек-диспетчер физически не способен обработать поток данных в такой ситуации. Традиционная автоматика (АЛАР, АЧР) работает по жестким алгоритмам (if-then), что не всегда оптимально в сложных переходных

режимах. Использование агентно-ориентированных моделей и глубокого обучения с подкреплением (Deep Reinforcement Learning) позволяет системе самостоятельно выбирать наилучшую стратегию локализации аварии, минимизируя объем отключаемой нагрузки. В работе [2] продемонстрировано, что в тестовой схеме IEEE 39 bus применение ИИ-агента позволило сохранить на 12 % больше потребителей по сравнению со штатными релейными защитами при идентичном типе возмущения.

В российской практике ярким примером является внедрение на подстанции 500 кВ «Южная» в Екатеринбурге нового цифрового комплекса для предотвращения нарушения устойчивости энергосистемы. Проект реализован ПАО «ФСК ЕЭС» совместно с АО «СО ЕЭС». В основе решения – скоростной цифровой обмен информацией между устройствами релейной защиты и автоматики с использованием международного протокола МЭК 61850-8.1. Централизованная система противоаварийного управления ОЭС Урала позволяет автоматически в режиме реального времени на основе расчета электроэнергетического режима выбрать оптимальные управляющие воздействия для обеспечения устойчивости энергосистемы при возникновении аварийных возмущений. Важно отметить, что новые устройства произведены в России [6].

Еще одним перспективным направлением является использование ИИ для поддержки работы диспетчерского персонала. В сентябре 2025 года АО «Системный оператор Единой энергетической системы» (СО ЕЭС) объявило о начале работ по созданию и внедрению системы автоматического распознавания диспетчерских переговоров [7]. Система на базе решения «Enbisyс.Поток» предназначена для автоматической расшифровки аудиофайлов переговоров 2–4 диспетчеров на русском языке с определением конкретного говорящего. Как отмечается в техническом задании, внедрение позволит минимизировать временные затраты на расшифровку данных и обеспечит накопление датасета для последующего дообучения нейросетевой модели [7].

Новым направлением стала инициатива «СО ЕЭС» по использованию ИИ для обеспечения качества данных синхронизированных векторных измерений (СВИ). В декабре 2025 года компания объявила конкурс на выполнение научно-исследовательской работы по разработке алгоритмов анализа причин потерь и задержек доставки СВИ на основе нейронных сетей [1]. Объем обрабатываемой информации достигает 25 млн телеизмерений в минуту от более чем 1150 устройств. Ручная диагностика аномалий из-за большого количества элементов (более 10000) становится практически нереализуемой. В рамках НИР предполагается использование нейросетей с архитектурой RNN/LSTM/Transformer [1].

Международные исследования также демонстрируют высокую эффективность ИИ в энергетике. Ученые Сианьского университета Цзяотун (Китай) в 2026 году опубликовали исследование, посвященное противоаварийному управлению на основе глубокого обучения. Предложенная архитектура использует глубокое обучение для извлечения пространственно-временных признаков из данных PMU в реальном времени. Эксперименты показали, что подход эффективно восстанавливает устойчивость в сценариях, где традиционные схемы не работают [8].

Тем не менее, внедрение ИИ в критическую инфраструктуру сопряжено с рядом проблем. Во-первых, это проблема «черного ящика»: отсутствие прозрачной

логики принятия решений для диспетчера. Во-вторых, высокая чувствительность к качеству входных данных (мусор на входе – мусор на выходе). В-третьих, уязвимость к целенаправленным кибератакам на обучающие выборки (data poisoning). Решение этих проблем лежит в плоскости создания гибридных систем, где ИИ выступает в роли советчика, а ключевые переключения остаются под контролем человека или верифицированной логики [1, с. 48]. Кроме того, требуется разработка новых нормативных документов, регламентирующих применение ИИ в электроэнергетике, а также подготовка кадров, способных обслуживать гибридные интеллектуальные системы управления.

Проведенный анализ позволяет утверждать, что автоматизация на основе ИИ в диспетчерских центрах – это не дань моде, а объективная необходимость. Цифровая трансформация электроэнергетики требует перехода от реактивного управления к упреждающему. Опыт «Росэнергоатома», «Россетей» и «Системного оператора» демонстрирует, что российская энергетика активно движется по этому пути, внедряя как точечные решения (предиктивная аналитика, распознавание речи, контроль качества данных СВИ), так и масштабные проекты (интеллектуальные противоаварийные комплексы). Несмотря на сложности интеграции и необходимость совершенствования нормативной базы, применение технологий искусственного интеллекта является ключевым фактором обеспечения надежности энергоснабжения в условиях высокой неопределенности современного общества.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку стандартов кибербезопасности для ИИ-систем и создание «цифровых двойников» сетей для ускоренного обучения алгоритмов без риска для реальной инфраструктуры. Также важным аспектом является подготовка кадров нового поколения, способных обслуживать гибридные интеллектуальные системы управления. В долгосрочной перспективе ожидается переход от систем поддержки принятия решений к полностью автономным интеллектуальным диспетчерским центрам, где ИИ будет выполнять не только рекомендательные, но и исполнительные функции в рамках строго верифицированных сценариев.

Список литературы:

1. Сендеров, С. М. Искусственный интеллект в электроэнергетике: современное состояние и перспективы / С. М. Сендеров, С. В. Смирнов. – Текст: непосредственный // Электрические станции. – 2024. – № 3. – С. 42-49.
2. Петров, А. В. Применение глубокого обучения с подкреплением для управления режимами электроэнергетических систем / А. В. Петров, Д. С. Кузнецов. – Текст: электронный // Известия РАН. Энергетика. – 2025. – № 2. – С. 55-67.
3. Воропай, Н. И. Интеллектуальные энергосистемы: методология и инструментарий / Н. И. Воропай, В. А. Стенников. – Новосибирск: Наука, 2023. – 312 с. – ISBN 978-5-02-041542-3.
4. На Белоярской АЭС введено в эксплуатацию новое интеллектуальное решение – система предиктивной аналитики. – Текст: электронный // АО «Концерн Росэнергоатом». – 2025. – URL: https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-beloyarskoy-aes/press-tsentr/novosti/49350/ (дата обращения: 28.03.2026).

5. Росэнергоатом начал внедрение на Белоярской АЭС системы безопасности, предсказывающей отклонения в работе. – Текст: электронный // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2024. – URL: <https://eepir.ru/new/rosenergoatom-nachal-vnedrenie-na-beloyarskoj-aes-nbsp-sistemy-bezopasnosti-predskazyvajushhej-otkloneniya-v-nbsp-rabote/> (дата обращения: 28.03.2026).
6. Новый российский цифровой комплекс для предотвращения нарушения устойчивости энергосистемы впервые внедрен в электросетях страны. – Текст: электронный // In-power. – 2026. – URL: <https://in-power.ru/news/elektroseti/25369-novyi-rossiiskii-cifrovoy-kompleks-dlja-predotvraschenija-narushenija-ustoichivost.html> (дата обращения: 28.03.2026).
7. «СО ЕЭС» внедрит ИИ в работу диспетчеров. – Текст: электронный // TAdviser. – 2025. – URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Проект:СО_ЕЭС_-_Системный_оператор_Единой_энергетической_системы (дата обращения: 28.03.2026).
8. Wang, L. Deep Learning-Based Emergency Control for AC/DC Hybrid Power Systems with High Renewable Energy Penetration / L. Wang, Y. Zhang, H. Liu. – Текст: электронный // IEEE Transactions on Power Systems. – 2026. – Vol. 41. – No 3. – P. 2345-2358.

© Каштелян Г. Д., 2026

СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РОТАЦИОННЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ (RDE)

студент Орлов Сергей Александрович,
канд. физ.-мат. наук, доцент

Никифоров Дмитрий Константинович,
Московский государственный технический университет имени
Н. Э. Баумана (Национальный исследовательский университет),
г. Калуга, Российская Федерация

Аннотация. Долгое время во всем мире качественно использовали цикл Брайтона, как эффективный и реализуемый цикл работы многих энергоустановок, пока в то же время были более эффективные циклы, такие как Хамфри, Фикетта–Джейкобса. За последние 5 лет мировая наука и промышленность показала успешными испытаниями, что можно использовать эти более эффективные термодинамические циклы не только в экспериментальных лабораторных условиях, но и в реальных. В частности, особое развитие получили ротационные детонационные двигатели (RDE – *Rotating Detonation Engines*).

Ключевые слова: детонационный двигатель, Rotating Detonation Engines, RDE, RDRJ, энергетика, цикл Фикетта–Джейкобса.

CURRENT CAPABILITIES AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF ROTARY DETONATION ENGINES (RDE)

Student Orlov Sergey Aleksandrovich,
PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Nikiforov Dmitry Konstaninovich,
Bauman Moscow State Technical University (National Research University),
Kaluga, Russian Federation

Abstract. The Brayton cycle has long been used worldwide as an efficient and feasible operating cycle for many power plants, while more efficient cycles such as the Humphrey and Fickett-Jacobs cycles were also available. Over the past five years, global science and industry have demonstrated through successful testing that these more efficient thermodynamic cycles can be used not only in experimental laboratory conditions but also in real-world applications. Rotating detonation engines (RDEs) have seen particular development.

Keywords: detonation engine, Rotating Detonation Engines, RDEs, RDRJs, energy, Fickett-Jacobs cycle.

Абсолютное большинство традиционных двигателей работают на основе дозвукового сжигания смеси топлива и окислителя (дефлаграции). Скорость распространения пламени в них составляет 10–100 м/с. Вращающийся

детонационный двигатель (RDE) работает по иному термодинамическому циклу – циклу Фикетта–Джейкобса [1].

В RDE топливо и окислитель непрерывно впрыскиваются в узкую коаксиальную (кольцевую) камеру сгорания. Вместо обычного воспламенения инициируется сверхзвуковая детонационная волна. Она безостановочно циркулирует по кольцу со скоростью от 2000 до 2500 м/с (число Маха = 5–7, внутри камеры) [1, 2].

При этом частота «вращения» (пульсаций) достигает: 5 000–20 000 Гц. В очень узком фронте волны смесь мгновенно сжимается и сгорает, согласно классической модели ZND (Зельдовича фон Неймана Дёринга), мгновенные скачки давления могут превышать начальное давление в 3–5 раз [1]. Этот процесс является процессом сгорания с повышением давления (PGC), он повышает термодинамический КПД цикла на 15–30 % по сравнению с классическим циклом Брайтона. Также очень важной особенностью, в частности, для промышленности, является то, что для работы цикла нет необходимости в компрессорах, что позволяет уменьшить габариты на 30–40 % [2].

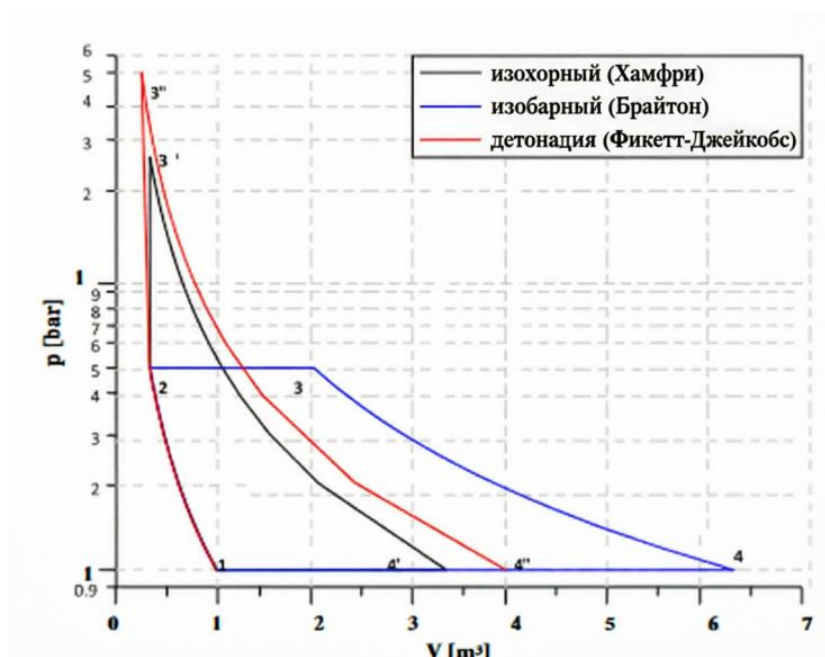


Рисунок 1. Термодинамические циклы Брайтона, Хамфри, Фикетта–Джейкобса [2]

Таблица 1. Сравнение термического КПД разных циклов при одной степени сжатия (=5) [2]

Топливо	Брайтон, %	Хамфри, %	Фикетта–Джейкобса, %
H_2	36,9	54,3	59,3
CH_4	31,4	50,5	53,2
C_2H_2	36,9	54,1	61,4

Использование в аэрокосмической отрасли

До 2021 года RDE тестировались преимущественно на наземных стендах в лабораторных условиях. В 2021 году Японское агентство аэрокосмических

исследований (JAXA) впервые испытало ротационный детонационный двигатель в открытом космосе [3].

Аппарат массой в несколько десятков килограммов был запущен на борту одноступенчатой геофизической ракеты S-520-31. На высоте 235 км, в условиях глубокого вакуума, модуль RDE успешно проработал 6 секунд. Используя в качестве топлива газообразный метан и кислород, двигатель сгенерировал тягу около 500 ньютонов (≈ 51 кгс), при этом рабочее давление в камере стабильно превышало 10 бар [3]. Данные телеметрии доказали, что детонационные волны не разрушаются в вакууме. Данное испытание открывает дорогу к созданию и испытанию более мобильных и экономичных реактивных двигателей для космических аппаратов.

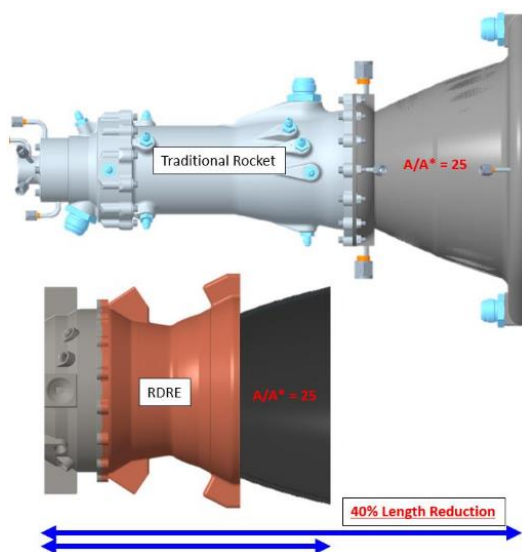


Рисунок 2. Пример сравнения геометрий камеры сгорания RDRE и традиционного ЖРД NASA CP WHALE

В мае 2025 года американская компания Venus Aerospace впервые осуществила полет летательного аппарата в атмосфере с помощью ротационного детонационного ракетного двигателя (RDRE) на полигоне в Нью-Мексико. Планируется, что аппарат сможет осуществлять межконтинентальные перелеты на высотах до 52 км (170 000 футов) со скоростью Мах 9 (около 11 000 км/ч), доставляя пассажиров из США в Японию всего за 1 час.

В начале 2026 года корпорации GE Aerospace и Lockheed Martin завершили стендовые испытания полномасштабного жидкотопливного детонационного ПВРД (RDRJ) [4]. Инженерам удалось в 3 раза увеличить пропускную способность воздухозаборника по сравнению с прототипами 2023 года. Двигатель продемонстрировал устойчивое детонационное горение авиационного керосина при набегающем потоке со скоростью свыше 4 Махов, доказав свою применимость для крылатых ракет нового поколения [4]. Также стоит отметить, что данный прототип способен начинать работать в прямоточном режиме при гораздо меньших числах Маха, следовательно, нужна менее слабая разгонная ступень.

Наземная энергетика. Анализируя таблицу 1, можно увидеть, что у RDE огромный потенциал в наземной теплоэнергетике [5]. Использование детонационного горения в совокупности с газовыми турбинами электростанций способно масштабировать их КПД.

Опытные испытания в Германии показывают обнадеживающие результаты. В 2024 году стартовала европейская программа H2POWRD, координатором которой стал Берлинский технический университет (TU Berlin). Цель программы – повышение общего электрического КПД водородных электростанций комбинированного цикла с текущих 60–62 % до 65–68 % [6].

Проблема электроэнергетики заключалась в том, что сверхзвуковые пульсации (с частотой 5–10 кГц) быстро разрушили бы лопатки стандартных генераторных турбин. Исследователи из TU Berlin успешно интегрировали водородный RDE с турбиной, разработав специальный расширяющийся диффузор. Он действует как акустический буфер, сглаживающий скачки давления до приемлемых $\pm 5\%$ от номинала перед подачей газов на лопатки [7].

В тоже время институт технологий тепловой энергии и безопасности (ITES) Технологического института Карлсруэ провел рекордные по длительности испытания RDE с полноценной выработкой электричества [9].

В ходе эксперимента была зафиксирована стабильная детонационная волна с частотой 8–12 кГц при непрерывной работе 303 секунды, что является рекордом работы без разрушения. Впервые в истории была продемонстрирована стабильная и длительная выработка электроэнергии непосредственно от турбины, питаемой детонационным двигателем [9].

Долгие годы создание RDE тормозилось так же и температурными барьерами, так как температуры в зоне детонации достигают 2500–2800 Кельвинов, что выше температуры плавления большинства суперсплавов [9].

Решение пришло со стороны аддитивных технологий. В 2025 году инженеры корпорации RTX успешно напечатали полномасштабный прототип RDE из металла. 3D-печать позволила создать монолитную конструкцию, включающую более 150 микроканалов для регенеративного охлаждения (с толщиной стенок между каналами всего 0,5–1 мм), которую невозможно изготовить традиционным фрезерованием. Для защиты стенок от прогорания сегодня также активно внедряются композиты с керамической матрицей (СМС), способные выдерживать температуры до 1500 °С без активного охлаждения [8].

Таблица 2. Сводная таблица технических показателей RDE (2021–2026 гг.)

Год	Организация	Ключевые показатели / Цифры
2021	JAXA (Япония)	Высота: 235 км, Тяга: 500 Н, Время: 6 с
2024	NETL (США)	Снижение выбросов NOx на 80%, частота до 10 кГц
2024	TU Berlin (ФРГ)	Целевой рост КПД электростанций до 65–68%
2025	Venus Aero (США)	Целевая высота: 52 км, Скорость: Мах 9
2025	RTX (США)	>100 каналов охлаждения толщиной стенок 0,5 мм
2026	TU Berlin (ФРГ)	Сглаживание пульсаций 5-10 кГц в буфере диффузора
2026	GE Aerospace	Стабильное горение при скорости > Мах 4; расход газа вырос в 3 раза
2026	KIT (ФРГ)	Время работы без разрушения: 303 секунды

Закключение. В период с 2021 по 2026 год технологии, связанные с ротационными детонационными двигателями, начали активно испытывать в условиях реальной эксплуатации. RDE доказывают возможность применения во всех соответствующих средах. Эта мощная технология в ближайшее время способна подарить людям как новые мощности в небе и космосе, так и энергоэффективность и экологичность в энергетике.

Список литературы:

1. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе; под ред. Р. И. Солоухина. – М.: Наука, 1980. – 478 с.
2. Wolański P. Detonative propulsion // Proceedings of the Combustion Institute. - 2013. - Vol. 34, Is. 1. - P. 125–158.
3. Progress of Experimental Studies on Oblique Detonation Waves Induced by Hyper-Velocity Projectiles // *Aerospace* (MDPI). 2024. Vol. 11(9). 715. DOI: 10.3390/aerospace11090715.
4. GE Aerospace. Using Ramjet Technology for Hypersonic Flight. January 2025. URL: <https://www.geaerospace.com>
5. Teasley T. W., Fedotowsky T. M., Gradl P. R. [et al.]. Current State of NASA Continuously Rotating Detonation Cycle Engine Development // AIAA SCITECH 2023 Forum. – National Harbor: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2023. - AIAA Paper 2023-1873.
6. Rotating detonation designs make progress on multiple continents [Электронный ресурс] // *Aerospace America*: [журнал]. – 2024. – URL: <https://aerospaceamerica.aiaa.org/> (дата обращения: 27.03.2026).
7. Hongyi Wei, Eric Bach, Christian Oliver Paschereit, Myles D. Bohon. «*Flow Dynamics in a Rotating Detonation Combustor and Its Interaction with a Turbine Proxy*» // AIAA Journal. 2025.
8. Ge H., Zhang L., Zhang H. [et al.]. Cyclic Ablation Properties of C/SiC-ZrC Composites // *Aerospace*. – 2024. – Vol. 11, Is. 6. – P. 432. – DOI: 10.3390/aerospace11060432.
9. Breakthrough green electricity generation with hydrogen: KIT researchers surpass NASA and achieve a technological breakthrough toward a CO₂-neutral energy system [Электронный ресурс] // Karlsruhe Institute of Technology (KIT): [официальный сайт]. – 2026. – URL: <https://www.ites.kit.edu/> (дата обращения: 27.03.2026).

© Орлов С. А., Никифоров Д. К., 2026

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИИ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

студент **Перепелкина Галина**
науч. руководитель: **Уланова Алла Валерьевна**,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается влияние цифровизации производственных процессов на повышение качества продукции и производительности предприятий пищевой промышленности. Проанализированы основные направления внедрения цифровых технологий, включая автоматизацию контроля, мониторинг технологических параметров, прослеживаемость сырья и продукции, а также использование информационных систем управления. Сделан вывод о том, что цифровизация способствует снижению потерь, повышению стабильности качества и росту эффективности производственной деятельности.

Ключевые слова: цифровизация, производственные процессы, пищевая промышленность, качество продукции, производительность, автоматизация, управление производством, цифровые технологии.

DIGITALIZATION OF PRODUCTION PROCESSES AS A FACTOR IN ENHANCING QUALITY AND PRODUCTIVITY AT A FOOD INDUSTRY ENTERPRISE

Student **Perepyolkina Galina**,
Academic Advisor: **Ulanova Alla Valerievna**,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«National Research University «MPEI»,
Moscow, Russian Federation

Abstract. The article examines the impact of digitalization of production processes on product quality improvement and productivity growth at food industry enterprises. The main areas of digital technology implementation are analyzed, including automation of control, monitoring of technological parameters, traceability of raw materials and products, as well as the use of production management information systems. It is concluded that digitalization helps reduce losses, improve quality stability, and increase production efficiency.

Keywords: digitalization, production processes, food industry, product quality, productivity, automation, production management, digital technologies.

Введение. В современных условиях развитие предприятий пищевой промышленности тесно связано с необходимостью повышения качества

выпускаемой продукции, сокращения производственных потерь и роста производительности труда. Усиление конкуренции, ужесточение требований к безопасности пищевой продукции, повышение роли прослеживаемости сырья и готовых изделий, а также потребность в оперативном принятии управленческих решений обуславливают актуальность цифровизации производственных процессов.

Пищевая промышленность относится к числу отраслей, в которых стабильность технологических режимов и своевременный контроль параметров производства имеют определяющее значение. Даже незначительные отклонения температуры, влажности, времени обработки, условий хранения или дозирования компонентов могут привести к ухудшению качества продукции, росту брака и дополнительным издержкам. В этой связи внедрение цифровых технологий позволяет обеспечить более высокий уровень управляемости производственной системы и снизить влияние человеческого фактора.

Цифровизация производственных процессов представляет собой комплекс мероприятий, направленных на внедрение информационных систем, автоматизированных средств контроля, инструментов анализа данных, цифрового мониторинга оборудования и технологий прослеживаемости. Ее практическое значение заключается в том, что предприятие получает возможность не только фиксировать текущие параметры производства, но и оперативно выявлять отклонения, прогнозировать риски и принимать обоснованные решения на основе данных.

Целью статьи является анализ влияния цифровизации производственных процессов на повышение качества продукции и производительности предприятия пищевой промышленности. Для достижения поставленной цели необходимо рассмотреть сущность цифровизации производственных процессов, определить специфику ее применения в пищевой промышленности, а также выявить ключевые направления влияния цифровых технологий на результативность деятельности предприятия.

Основная часть. Цифровизация производственных процессов является одним из ключевых направлений трансформации современных предприятий. В широком смысле под цифровизацией понимается внедрение цифровых технологий в систему управления, контроля, планирования и организации производственной деятельности. В отличие от частичной автоматизации отдельных операций, цифровизация предполагает формирование единого информационного пространства, в рамках которого данные о сырье, оборудовании, параметрах технологического процесса, качестве продукции и результатах производственной деятельности используются комплексно [1].

Для предприятий пищевой промышленности цифровизация имеет особое значение, поскольку производственный процесс здесь характеризуется высокой чувствительностью к отклонениям технологических параметров и строгими требованиями к качеству и безопасности продукции. Внедрение цифровых технологий позволяет обеспечить более точное регулирование технологических операций, сократить время реакции на отклонения и повысить прозрачность производственной системы [2].

К числу наиболее распространенных цифровых решений, применяемых на производстве, относятся ERP-системы, MES-системы, автоматизированные системы контроля качества, датчики мониторинга технологических параметров, системы учета и прослеживаемости сырья и готовой продукции, а также аналитические платформы для обработки производственных данных. Эти инструменты позволяют увязать управленческие и производственные процессы, повысить уровень координации между подразделениями и обеспечить непрерывное сопровождение продукции на всех стадиях ее изготовления.

Цифровизация производственных процессов выполняет несколько значимых функций. Во-первых, она обеспечивает сбор, хранение и обработку информации о ходе производства. Во-вторых, позволяет осуществлять оперативный контроль параметров и выявлять отклонения в режиме, близком к реальному времени. В-третьих, способствует повышению точности планирования и распределения ресурсов. В-четвертых, создает основу для совершенствования системы качества и повышения производительности предприятия.

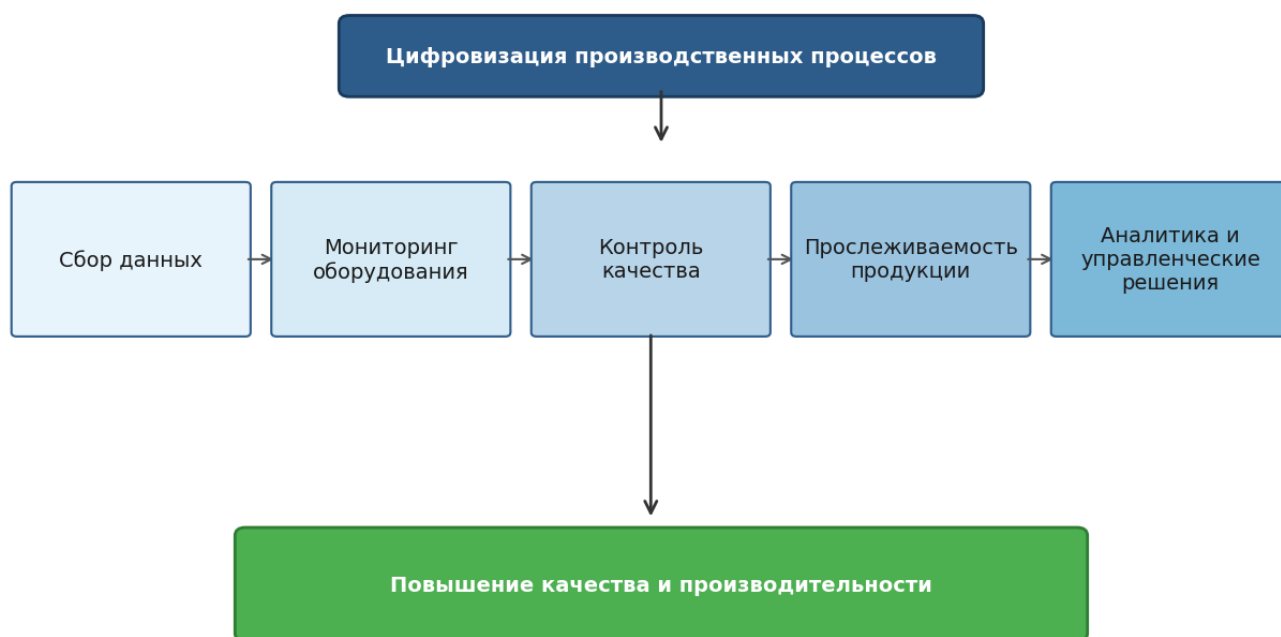


Рисунок 1. Основные направления цифровизации производственных процессов на предприятии пищевой промышленности

Как видно на рисунке 1, цифровизация производственных процессов включает не отдельные разрозненные решения, а взаимосвязанную систему элементов, охватывающих контроль, учет, анализ и управление. Комплексный характер цифровизации определяет ее влияние не только на технические параметры производства, но и на итоговые показатели деятельности предприятия.

Предприятия пищевой промышленности обладают рядом особенностей, которые определяют высокую значимость цифровизации. К таким особенностям относятся ограниченные сроки хранения сырья и готовой продукции, необходимость соблюдения санитарно-гигиенических норм, зависимость качества конечного продукта от стабильности технологического режима, а также высокая

чувствительность производства к перебоям в поставках, простоям оборудования и ошибкам персонала.

Одним из важнейших требований к деятельности пищевого предприятия является обеспечение стабильного качества продукции. Для этого необходимо поддерживать постоянный контроль входящего сырья, соблюдать рецептурные параметры, отслеживать режимы обработки и обеспечивать соответствующие условия упаковки, маркировки и хранения. При традиционной организации производства без развитой цифровой поддержки возрастает риск несвоевременного обнаружения отклонений, потери данных и снижения точности контроля [3].

Не менее важной задачей является повышение производительности. В пищевой промышленности этот показатель зависит не только от скорости работы оборудования, но и от рационального использования сырья, минимизации потерь, сокращения времени переналадки, снижения числа простоев и оптимизации логистики внутри предприятия. Цифровые решения позволяют существенно улучшить координацию процессов и повысить эффективность производственной системы в целом.

Таблица 1. Влияние цифровых технологий на качество продукции и производительность предприятия пищевой промышленности

Цифровое решение	Область применения	Влияние на качество	Влияние на производительность
ERP-система	Планирование ресурсов, учет сырья, координация подразделений	Повышение точности учета и прослеживаемости	Сокращение времени на планирование и согласование
MES-система	Оперативное управление производством	Контроль соблюдения технологических режимов	Снижение потерь времени в ходе выполнения операций
Датчики и мониторинг	Контроль температуры, влажности, давления, дозирования	Снижение риска отклонений и брака	Предупреждение сбоев и простоев
Система прослеживаемости	Учет партий сырья и готовой продукции	Быстрое выявление источников несоответствий	Ускорение обработки информации и контроля
Автоматизированный контроль качества	Проверка параметров продукции	Повышение стабильности качества	Сокращение времени на контрольные операции
Аналитика данных	Оценка эффективности процессов	Выявление причин дефектов	Оптимизация использования ресурсов

В таблице 1 показано, что цифровые технологии оказывают комплексное влияние на деятельность предприятия пищевой промышленности. Их применение позволяет одновременно решать задачи обеспечения качества, повышения прозрачности процессов и роста производительности.

Качество продукции на предприятии пищевой промышленности формируется на всех стадиях производственного процесса: от входного контроля сырья до упаковки и хранения готового продукта. Внедрение цифровых технологий позволяет повысить результативность контроля на каждом из этих этапов.

На стадии приемки сырья цифровые системы обеспечивают фиксацию данных о поставщике, параметрах партии, сроках годности, условиях транспортировки и результатах входного контроля. Это повышает точность учета и облегчает дальнейшую прослеживаемость. На стадии переработки цифровые датчики и системы автоматизированного контроля позволяют отслеживать ключевые параметры технологического процесса и своевременно реагировать на отклонения.

Особое значение имеет применение цифровых решений в системе управления качеством. Автоматизированный контроль помогает стандартизировать процедуры проверки, сократить вероятность субъективных ошибок и обеспечить более высокую достоверность результатов. Кроме того, накопление данных о параметрах процесса и результатах контроля позволяет выявлять повторяющиеся причины дефектов и принимать меры по их устранению.

Еще одним важным направлением является прослеживаемость продукции. Возможность быстро установить происхождение сырья, параметры его обработки и условия хранения готовой продукции повышает устойчивость системы качества и облегчает принятие корректирующих решений в случае выявления несоответствий (рисунок 2).

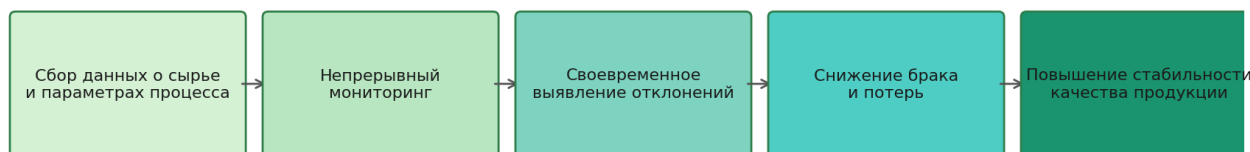


Рисунок 2. Механизм влияния цифровизации на качество продукции

Таким образом, цифровизация способствует переходу от эпизодического контроля к непрерывному сопровождению качества. Это особенно важно для пищевой промышленности, где надежность контроля напрямую связана с безопасностью продукции и репутацией предприятия.

Производительность предприятия пищевой промышленности определяется способностью выпускать необходимый объем продукции с минимальными затратами времени, сырья, энергии и трудовых ресурсов. Цифровизация оказывает влияние на данный показатель за счет оптимизации процессов планирования, координации производственных операций, сокращения простоев и более рационального распределения ресурсов.

Одним из значимых эффектов цифровизации является повышение точности производственного планирования. ERP- и MES-системы позволяют согласовывать данные о запасах сырья, загрузке оборудования, производственных заданиях и сроках выполнения заказов. Это снижает вероятность несогласованности действий различных подразделений и способствует более ритмичной организации производства.

Важным фактором роста производительности также является сокращение простоев оборудования. Цифровой мониторинг технического состояния машин и механизмов позволяет своевременно обнаруживать признаки неисправностей, планировать техническое обслуживание и снижать риск аварийных остановок. В результате предприятие получает возможность повысить коэффициент использования оборудования и стабилизировать выпуск продукции.

Кроме того, цифровизация способствует ускорению принятия решений. Наличие актуальной информации о состоянии производственной системы дает руководителям и специалистам возможность оперативно корректировать производственный график, перераспределять ресурсы и устранять причины неэффективности. Это особенно важно в условиях высокой динамики производственных процессов и ограниченных сроков хранения продукции (рисунок 3).

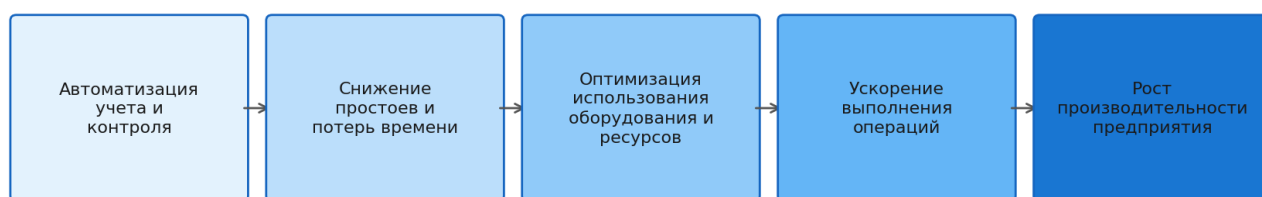


Рисунок 3. Механизм влияния цифровизации на производительность предприятия

Следовательно, влияние цифровизации на производительность носит системный характер и охватывает не только технологический уровень, но и организацию управления предприятием в целом.

Для обобщения возможных результатов внедрения цифровых решений на предприятии пищевой промышленности целесообразно использовать диаграмму, отражающую основные направления улучшений.

Данные, представленные на диаграмме, отражают обобщенную модель эффектов цифровизации производственных процессов на предприятии пищевой промышленности. Наибольший результат достигается в области повышения точности учета и ускорения контрольных операций, что создает основу для снижения производственных потерь и роста производительности труда.



Рисунок 4. Основные эффекты цифровизации производственных процессов на предприятии пищевой промышленности

Для конкретизации теоретических положений рассмотрим цифровую трансформацию ГК «Черкизово» как одного из крупных предприятий пищевой промышленности России. В 2024 году компания приступила к разработке ERP-системы «Мичурин» – единой цифровой платформы, которая должна объединить подразделения группы и стандартизировать ключевые процессы. Одновременно развивались проекты автоматизации производства и учета энергоресурсов [6].

Поскольку в открытых источниках не раскрыт прямой экономический эффект проекта по статьям «снижение брака» или «сокращение простоев», для целей исследования целесообразно использовать укрупненную расчетную оценку. Предположим, что на одном из производственных комплексов группы до внедрения цифровых решений потери от брака составляли 24 млн руб. в год, а потери от простоев оборудования – 36 млн руб. в год. В результате внедрения цифрового мониторинга, автоматизации производственных операций и усиления управленческой аналитики снижение брака составило 12 %, а сокращение простоев – 15 %. Экономический эффект от снижения брака определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_1 = \text{Пб} \times \text{Сб},$$

где Пб – потери от брака до внедрения, руб.;

Сб – доля снижения брака.

Тогда:

$$\mathcal{E}_1 = 24\,000\,000 \times 0,12 = 2\,880\,000 \text{ руб.}$$

Экономический эффект от сокращения простоев определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_2 = \text{Пп} \times \text{Сп},$$

где Пп – потери от простоев до внедрения, руб.;

Сп – доля сокращения простоев.

Тогда:

$$\mathcal{E}_2 = 36\,000\,000 \times 0,15 = 5\,400\,000 \text{ руб.}$$

Совокупный годовой экономический эффект составит:

$$\mathcal{E}_{\text{общ}} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = 2\,880\,000 + 5\,400\,000 = 8\,280\,000 \text{ руб.}$$

Если принять расчетные затраты на внедрение цифровых решений на выбранном производственном комплексе в размере 24 000 000 руб., срок окупаемости можно определить так:

$$T = 3 / \mathcal{E}_{\text{общ}} = 24\,000\,000 / 8\,280\,000 = 2,9 \text{ года}$$

Таблица 2. Расчетная оценка эффекта цифровизации на примере ГК «Черкизово»

Показатель	До внедрения	После внедрения	Изменение
Потери от брака, руб./год	24 000 000	21 120 000	-12 %
Потери от простоев, руб./год	36 000 000	30 600 000	-15 %
Совокупный годовой экономический эффект, руб.	—	8 280 000	—
Показатель	До внедрения	После внедрения	Изменение
Затраты на внедрение, руб.	—	24 000 000	—
Срок окупаемости, лет	—	2,9	—

Таким образом, данные таблицы показывают, что внедрение цифровых решений на производственном комплексе ГК «Черкизово» обеспечивает заметный экономический эффект за счет снижения потерь от брака и сокращения простоев оборудования. Полученный результат подтверждает, что цифровизация производственных процессов способствует не только повышению качества продукции, но и росту производительности, что в совокупности повышает эффективность деятельности предприятия.

Несмотря на существенные преимущества, цифровизация производственных процессов сопровождается рядом ограничений. К основным проблемам относятся значительные первоначальные затраты на внедрение цифровых систем, необходимость модернизации оборудования, сложность интеграции новых решений в существующую инфраструктуру, а также потребность в обучении персонала.

Дополнительным ограничением может выступать сопротивление изменениям со стороны работников, привыкших к традиционным методам организации труда. В таких условиях эффективность цифровизации во многом определяется качеством управленческих решений, уровнем подготовки специалистов и степенью готовности предприятия к преобразованиям [4].

Следует также учитывать риски, связанные с информационной безопасностью. Чем выше уровень цифровизации, тем более значимой становится задача защиты производственных данных, исключения несанкционированного доступа и обеспечения устойчивости информационных систем.

Однако при системном подходе к внедрению цифровых технологий перечисленные ограничения могут быть преодолены. В этом случае цифровизация становится не разовой мерой, а долгосрочным направлением развития предприятия, обеспечивающим его конкурентоспособность и устойчивость [5].

Заключение. Цифровизация производственных процессов является важным фактором повышения качества продукции и производительности предприятия пищевой промышленности. Ее значение определяется возможностью обеспечить непрерывный контроль технологических параметров, повысить прозрачность движения сырья и готовой продукции, сократить влияние человеческого фактора на результаты контроля, точность учета и соблюдение технологических режимов и создать условия для оперативного принятия управленческих решений.

Проведенный анализ показал, что внедрение цифровых технологий способствует снижению брака, уменьшению потерь, сокращению простоев оборудования, повышению точности учета и росту эффективности использования ресурсов. Наибольший эффект достигается при комплексном применении ERP и MES-систем, цифрового мониторинга оборудования, автоматизированного контроля качества и систем прослеживаемости.

Таким образом, цифровизация производственных процессов должна рассматриваться как стратегическое направление развития предприятий пищевой промышленности, обеспечивающее повышение качества продукции, рост производительности и укрепление конкурентных позиций предприятия в современных условиях.

Список литературы:

1. Поляков, С. Л. Цифровизация производственных процессов как инструмент повышения качества выпускаемой продукции [Электронный ресурс] / С. Л. Поляков, Н. В. Маркелова, Ю. В. Разинкина. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-proizvodstvennyh-protsessov-kak-instrument-povysheniya-kachestva-vypuskaemoy-produktsii>. (дата обращения: 25.03.2026).
2. Али, Б. А. Цифровые технологии в развитии пищевой промышленности [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-tehnologii-v-razviti-pischevoy-promyshlenosti-1>. (дата обращения: 22.03.2026).
3. Кетоева, Н. Л. Средства и методы управления качеством в эпоху цифровой экономики: учебное пособие / Н. Л. Кетоева и др. – М.: МЭИ, 2023. – 504 с.
4. Степанова, А. А. Эффективность цифровой трансформации: сущность, содержание, критерии оценки [Электронный ресурс] / А. А. Степанова, М. В. Савина, И. А. Степанов. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-tsifrovoy-transformatsii-suschnost-soderzhanie-kriterii-otsenki>. (дата обращения: 20.03.2026).
5. Акиндинов, В. В. Системный подход к цифровизации в организациях АПК [Электронный ресурс]. – В. В. Акиндинов, А. С. Лосева, К. В. Акиндинов, А. Е. Лосева. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnyy-podhod-k-tsifrovizatsii-v-organizatsiyah-apk> (дата обращения: 19.03.2026).
6. Официальный сайт «Черкизово» [Электронный ресурс]. – URL: <https://cherkizovo-group.com/> (дата обращения: 26.03.2026).

© Перепелкина Г., 2026

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДИКТИВНОГО АНАЛИЗА

студент **Васбиев Артур Динарович**,
студент **Волостнов Вадим Владимирович**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент
Бадретдинова Гузель Рамилевна,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Статья рассматривает применение предиктивного анализа для повышения эффективности управления абсорбционными бромистолитиевыми холодильными машинами (АБХМ) в составе парогазовых установок (ПГУ). Разобраны факторы, определяющие реальный КПД таких систем, и показано, почему традиционные подходы к обслуживанию не позволяют удерживать работу в расчётном режиме. В качестве примера российской практики рассмотрено внедрение системы предиктивной аналитики «ПРАНА» компании АО «РОТЕК».

Ключевые слова: предиктивное управление, АБХМ, абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина, ПГУ, коэффициент производительности COP, эксергетический анализ, система «ПРАНА», удалённый мониторинг.

EFFICIENCY OF ENERGY PLANT MANAGEMENT USING PREDICTIVE ANALYTICS

Student **Vasbiev Artur Dinarovich**,
Student **Volostnov Vadim Vladimirovich**,
Academic Advisor: PhD in Engineering, Associate Professor
Badretdinova Guzel Ramilevna,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia

Abstract. The paper examines the application of predictive analytics to improve the efficiency of absorption lithium bromide chiller (ABLC) management within combined cycle power plants (CCPP). The key factors determining the actual coefficient of performance of such systems are analysed, and it is shown why conventional maintenance approaches fail to sustain operation at design parameters. The deployment of the PRANA predictive analytics platform developed by ROTEK JSC is considered as a case study of Russian industrial practice.

Keywords: predictive analytics, absorption lithium bromide chiller, ABLC, combined cycle power plant, coefficient of performance (COP), exergy analysis, condition-based maintenance, remote monitoring system.

Абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины (АБХМ) широко применяются в составе парогазовых установок для утилизации бросового тепла и

охлаждения циклового воздуха. Несмотря на относительную конструктивную простоту, реальная эффективность таких установок существенно зависит от совокупности переменных параметров, которые невозможно контролировать без непрерывного мониторинга. Настоящая работа рассматривает, как методы предиктивного анализа позволяют выявлять отклонения от расчётного режима заблаговременно и предотвращать как снижение КПД, так и аварийные ситуации.

Для АБХМ используют понятие коэффициента производительности (COP). Тепловой коэффициент – отношение полученного холода к подведённой тепловой энергии – составляет 0,65–0,8 для одноступенчатых машин и 1,0–1,52 для двухступенчатых. Уже это соотношение показывает: выбор типа установки принципиален. Двухступенчатая машина в полтора-два раза эффективнее, но требует теплоносителя с более высокими параметрами [1].

Источником энергии в одноступенчатых машинах служит водяной пар низкого давления – 0,1–0,15 МПа или горячая вода 90–115°C. В двухступенчатых требуется пар среднего давления – 0,5–0,8 МПа, газообразное или жидкое топливо. Из этого следует важное практическое следствие: если источник тепла деградирует – котёл теряет производительность, давление пара падает – двухступенчатая машина уходит от расчётного режима резче, чем одноступенчатая. Система становится чувствительной именно там, где её принято считать надёжной.

На реальные показатели работы конкретной системы ПГУ-110–АБХМ указывают данные термодинамического анализа. Измеренные летом 2019 года параметры показали систематическое отклонение от проектных значений: концентрация крепкого раствора LiBr составляла 56,2–57,1 % при проектном значении 60,5 %, кратность циркуляции достигала 12,4–14,4 против проектных 9,8, а расход хладагента не превышал 0,9–1,1 кг/с при проектных 1,5 кг/с. Иными словами, машина работала, но не так, как была спроектирована. Эксергетический КПД ПГУ при реальных условиях составил 46,5 % – показатель, за которым стоит конкретный потенциал повышения эффективности.

Отдельную роль играет температура охлаждающей воды. Чтобы не допустить повышения температуры бромид лития и потери его абсорбирующих свойств, необходима охлаждающая вода, стабилизирующая температуру раствора в абсорбере [2]. Летом градирня работает при высокой температуре наружного воздуха – охлаждающая вода теплее, абсорбция хуже. Это предсказуемый сезонный эффект, но без непрерывного мониторинга его трудно отделить от постепенной деградации теплообменных поверхностей.

Наконец, размер установки имеет значение не только в абсолютном выражении. При мощностях ниже 500 кВт цена АБХМ примерно вдвое выше стоимости компрессорного чиллера, тогда как при мощностях 2 МВт и выше стоимость сближается. Это означает, что для небольших объектов экономическое обоснование применения АБХМ строится исключительно на дешевизне источника тепла, и любое снижение реального COP разрушает бизнес-логику всей схемы.

Основными направлениями исследования действующей энергопреобразующей системы с учётом её технических ограничений являются оптимизация и прогнозирование на основе анализа режимов работы. Это не просто академический тезис – это описание практической задачи, для которой предиктивный анализ предлагает конкретный инструментарий.

Применительно к АБХМ предиктивная система решает две взаимосвязанные задачи. Первая – непрерывная оценка отклонения текущего режима от расчётного. Концентрация раствора LiBr, кратность циркуляции, расход хладагента – всё это косвенно восстанавливается из показаний температурных датчиков и расходомеров [3]. Алгоритм строит трендовую картину: не просто фиксирует, что сегодня COP ниже вчерашнего, а оценивает скорость деградации и рассчитывает, через сколько дней система выйдет за допустимые пределы.

Вторая задача – предупреждение кристаллизации раствора. Это специфический риск АБХМ, не имеющий аналогов в компрессорных системах. Концентрированный LiBr кристаллизуется при снижении температуры – например, при резком сбросе нагрузки или аварийном падении давления пара [3]. Характерный предвестник кристаллизации – сближение температур в абсорбере и конденсаторе на фоне роста разности концентраций растворов. Модели, обученные на исторических данных конкретной установки, распознают этот паттерн заблаговременно.

Компанией АО «РОТЕК» создан первый в России Центр удалённого мониторинга и прогностики с собственным программным обеспечением. Программно-технический комплекс «ПРАНА» осуществляет непрерывную диагностику, оценку ресурса узлов и деталей, анализ и прогнозирование изменения технического состояния объекта [4].

Сигналы данных с микроконтроллеров поступают на сервер нижнего уровня на территории объекта, затем транслируются по защищённому каналу в Центр обработки данных для долгосрочного хранения и анализа. Принципиально важно, что система не требует изменений в конфигурации существующего оборудования – она интегрируется в штатную АСУ ТП.

К системе «ПРАНА» уже подключено технологическое оборудование суммарной мощностью более 3,5 ГВт и стоимостью 5 миллиардов долларов. Компании, подключённые к системе, получают не просто мониторинг отклонений, а полноценную экспертную поддержку; при этом экспертный центр может быть распределённым – объединяя специалистов как разработчика, так и самого заказчика.

Согласно данным ряда отраслевых исследований, внедрение систем предсказания отказов промышленного оборудования способно увеличить срок его службы на 20–40 % и сократить время простоев на 30–50 % [5].

АБХМ – герметичная вакуумная система. Часть ключевых параметров физически недоступна для прямого измерения: концентрацию раствора, состояние теплообменных поверхностей, плотность вакуума приходится оценивать косвенными методами. Это ограничение встроено в саму конструкцию машины, и никакой алгоритм его не устраняет – он лишь делает косвенные оценки точнее.

Каждый компонент прогностики – сбор данных, исследовательский анализ и предиктивное моделирование – обладает рядом проблем, которые сегодня пытаются решить все участники рынка предиктивной диагностики. Для АБХМ острее всего стоит проблема «холодной базы»: на объектах, где машина работает первые 1–2 года, исторических данных для обучения точной модели попросту нет. В таких случаях используют либо упрощённые физические модели, либо данные с аналогичных установок – оба варианта снижают точность прогнозов.

Третья проблема – организационная. Предиктивная система рекомендует вывести агрегат в ремонт в конкретное «окно», но это решение конкурирует с действующими регламентами, планами нагрузки и инерцией эксплуатационного персонала. Технически внедрить систему и добиться того, чтобы её рекомендации действительно меняли поведение операторов – принципиально разные задачи.

Система ПГУ–АБХМ – наглядный пример, где разрыв между проектными и реальными показателями эффективности накапливается постепенно и незаметно. Анализ реальных данных эксплуатации показывает: термодинамический анализ с определением деструкции эксергии позволяет выявить конкретный потенциал повышения эффективности системы – но это возможно только при наличии непрерывного потока достоверных измерений.

Предиктивный анализ меняет логику управления: вместо реакции на уже свершившийся отказ или слепого следования регламенту – проактивное управление режимом на основе трендов. Российский рынок движется в этом направлении: крупные энергокомпании организуют центры удалённого мониторинга, где в режиме реального времени на отечественном программном продукте с применением ИИ анализируется техническое состояние оборудования и строятся прогнозы выхода из строя [6].

Главный нерешённый вопрос – не в алгоритмах, а в инфраструктуре и данных. Пока на большинстве действующих объектов система измерений спроектирована для контроля, а не для обучения моделей, предиктивный анализ будет давать результаты ниже своего потенциала. Создание полноценной измерительной базы – это инженерная задача ближайшего десятилетия, не менее важная, чем разработка самих алгоритмов.

Список литературы:

1. Менделеев, Д. И. Исследование влияния условий эксплуатации на эффективность использования абсорбционно-холодильной машины в цикле газотурбинных и парогазовых установок / Д. И. Менделеев, Г. Е. Марьин, Ю. Я. Галицкий, А. Р. Ахметшин // Вестник ИпГТУ. – 2020. – № 4 (153). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-usloviy-ekspluatatsii-na-effektivnost-ispolzovaniya-absorbtsionno-holodilnoy-mashiny-v-tsikle-gazoturbinnnyh> (дата обращения: 27.03.2026).
2. Бараненко, А. В. Холодильные машины: учебник / А. В. Бараненко, Н. Н. Бухарин, В. И. Пекарев, Л. С. Тимофеевский; под общ. ред. Л. С. Тимофеевского. – СПб.: Политехника, 1997. – 199 с.
3. Салихов, М. Р. Алгоритм прогнозирования состояния оборудования на основе машинного обучения / М. Р. Салихов, Р. А. Юрьева // Известия вузов. Приборостроение. – 2022. – Т. 65, № 9. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-prognozirovaniya-sostoyaniya-oborudovaniya-na-osnove-mashinnogo-obucheniya> (дата обращения: 27.03.2026).
4. Липатов, М. С. Первый в России комплекс предиктивной аналитики для энергетического и промышленного оборудования // Экспозиция. Нефть. Газ. – 2016. – № 3 (49). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pervyy-v-rossii-kompleks-prediktivnoy-analitiki-dlya-energeticheskogo-i-promyshlennogo-oborudovaniya> (дата обращения: 28.03.2026).

5. Общение с предсказаниями // Коммерсантъ. – 2022. – 12 дек. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5706742> (дата обращения: 28.03.2026).

6. Бубнов, К. Н. Система непрерывного мониторинга технического состояния и оперативной диагностики паровой турбины / К. Н. Бубнов, В. П. Жуков, А. В. Голубев [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2023. – № 4. – С. 85–93. – DOI 10.17588/2072-2672.2023.4.085-093.

Примечание. При написании статьи были применены технологии искусственного интеллекта.

© Васбиев А. Д., Волостнов В. В., 2026

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО ПРЕДИКТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМИ РЕЖИМАМИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

студент **Минькина Анастасия Константиновна**,
науч. руководитель: канд. физ.-мат. наук, доцент

Потапов Андрей Александрович,

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Рассматривается задача автоматического управления температурой в проходной промышленной печи с большим транспортным запаздыванием. Показано, что классические ПИД-регуляторы в таких условиях приводят к колебательности или потере устойчивости. Предложена архитектура адаптивного предиктивного регулятора на основе модели Смита с автоматической настройкой параметров по эталонной модели. Представлены результаты компьютерного моделирования, демонстрирующие снижение перерегулирования в 3,5 раза и сокращение времени переходного процесса на 42 % по сравнению с оптимальным ПИД-регулятором. Сделан вывод о применимости разработки в металлургии, химической и пищевой промышленности.

Ключевые слова: автоматическое управление, промышленная печь, транспортное запаздывание, предиктивный регулятор, модель Смита, адаптация, температурный режим.

DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE PREDICTIVE CONTROLLER FOR TEMPERATURE CONTROL IN INDUSTRIAL FURNACES WITH TIME DELAY

Student **Minkina Anastasia Konstantinovna**,

Academic Advisor: PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Potapov Andrey Alexandrovich,

Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The paper considers the problem of automatic temperature control in a continuous industrial furnace with a large transport delay. It is shown that classical PID controllers under such conditions lead to oscillation or loss of stability. An architecture of an adaptive predictive controller based on the Smith predictor with automatic parameter tuning according to a reference model is proposed. The results of computer simulation demonstrate a 3.5-fold reduction in overshoot and a 42% reduction in transient time compared to an optimal PID controller. The conclusion is made about the applicability of the development in metallurgy, chemical and food industries.

Keywords: automatic control, industrial furnace, transport delay, predictive controller, Smith predictor, adaptation, temperature regime.

Промышленные проходные печи широко применяются в металлургии при термической обработке металлов, в химической промышленности для обжига катализаторов, а также в производстве строительных материалов и пищевой промышленности. Одной из ключевых задач автоматизации таких объектов является поддержание заданной температуры в рабочей зоне с высокой точностью при изменяющейся нагрузке и внешних возмущениях. Особенность многих промышленных печей заключается в наличии значительного транспортного запаздывания, которое возникает из-за конечной скорости движения материала через печь, инерционности теплообмена и времени распространения теплового потока от нагревательных элементов к датчику температуры. Это запаздывание делает классические пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы малоэффективными, так как система управления реагирует на изменение выходной переменной лишь спустя длительное время после подачи управляющего воздействия, что неизбежно приводит к перерегулированию, колебаниям и даже потере устойчивости [1]. В связи с этим разработка специализированных алгоритмов управления для объектов с запаздыванием является актуальной научно-технической задачей [2].

Целью настоящей работы является разработка и исследование адаптивного предиктивного регулятора температуры для промышленной проходной печи с большим транспортным запаздыванием. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи. Во-первых, провести анализ объекта управления и построить его математическую модель в виде передаточной функции с запаздыванием первого порядка. Во-вторых, синтезировать структуру предиктивного регулятора на основе модели Смита, обеспечивающую компенсацию запаздывания [3]. В-третьих, разработать механизм адаптивной настройки параметров регулятора по эталонной модели, позволяющий сохранять качество управления при изменении параметров объекта. В-четвертых, выполнить компьютерное моделирование и сравнить предложенный регулятор с оптимальным ПИД-регулятором по таким критериям, как перерегулирование, время переходного процесса и интегральная квадратичная ошибка [4].

Исследование проводилось методом компьютерного моделирования в среде MATLAB/Simulink. Объект управления был принят в виде апериодического звена первого порядка с передаточной функцией следующего вида:

$$W(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s}, \quad (1)$$

где K – коэффициент усиления,

T – постоянная времени,

τ – транспортное запаздывание.

Для исследуемой промышленной печи параметры составили: $K=2,5$, $T=120$ с, $\tau=45$ с. Отношение $\tau/T=0,375$ характеризует объект как сложный для управления классическими методами [1, с. 405-408].

В качестве базового регулятора для сравнения был выбран ПИД-регулятор, оптимально настроенный методом Циглера – Никольса по критерию минимума квадратичной интегральной ошибки. Предложенный адаптивный предиктивный регулятор включал три основных блока. Первый блок – модель объекта без запаздывания, которая использовалась для вычисления прогнозируемого выходного сигнала. Второй блок – основной ПИД-регулятор, настроенный на модель без запаздывания, что позволило значительно увеличить коэффициент усиления без риска потери устойчивости [3, р. 29]. Третий блок – адаптивный контур корректировки параметров на основе эталонной модели, который в реальном времени подстраивал коэффициент усиления регулятора при отклонении выходной температуры от желаемой траектории [5, с. 57-59]. Адаптация параметров регулятора выполнялась по градиентному закону:

$$k(t + \Delta t) = k(t) - \gamma \frac{\partial E(t)}{\partial k(t)}, \quad (2)$$

где $k(t)$ – настраиваемый коэффициент усиления в момент времени t , γ – шаг адаптации (принят равным 0,01), $E(t)$ – функция ошибки между выходом реального объекта и эталонной модели. Желаемая динамика эталонной модели описывалась передаточной функцией:

$$W_{ref}(s) = \frac{1}{T_{ref}s + 1} \quad (3)$$

с постоянной времени $T_{ref} = 20$ с.

В ходе компьютерного моделирования были получены следующие результаты. При обработке ступенчатого задающего воздействия оптимальный ПИД-регулятор обеспечил перерегулирование 38 %, время переходного процесса по уровню входа в пятипроцентный коридор составило 210 секунд. При этом после завершения переходного процесса сохранялись малозатухающие колебания с амплитудой около 2 % от установившегося значения, что объясняется влиянием некомпенсированного запаздывания. Интегральная квадратичная ошибка за 600 секунд моделирования составила 1245 единиц. Предложенный адаптивный предиктивный регулятор показал существенно лучшие результаты. Перерегулирование не превысило 11 %, что в 3,5 раза меньше, чем у ПИД-регулятора. Время переходного процесса сократилось до 122 секунд (уменьшение на 42 %). Колебания в установившемся режиме практически отсутствовали – амплитуда остаточных пульсаций не превышала 0,3 %. Интегральная квадратичная ошибка снизилась до 412 единиц (улучшение в три раза) [4, с. 18]. Особенно важно, что при имитации возмущения в виде изменения коэффициента усиления объекта на 25 % (что соответствует, например, изменению толщины обрабатываемого металла или загрязнению теплообменных поверхностей) адаптивный регулятор восстановил заданный режим за 95 секунд, тогда как ПИД-регулятор без перенастройки вышел на новый установившийся режим лишь через 340 секунд с перерегулированием 52 %. Это подтверждает высокую робастность предложенного решения. Дополнительно была исследована устойчивость адаптивного регулятора

при изменении запаздывания τ в пределах от 30 до 60 секунд. Во всем этом диапазоне система оставалась устойчивой, причем максимальное перерегулирование не превышало 18 %, что свидетельствует о хорошей работоспособности алгоритма в реальных производственных условиях, где параметры объекта могут медленно дрейфовать [2, с. 232-233].

В настоящей работе разработан и исследован адаптивный предиктивный регулятор температуры для промышленной проходной печи с большим транспортным запаздыванием. Предложенная архитектура, основанная на модели Смита с дополнительным контуром адаптации по эталонной модели [3], позволяет компенсировать негативное влияние запаздывания и автоматически подстраиваться под изменение параметров объекта. Результаты компьютерного моделирования показали, что по сравнению с оптимальным ПИД-регулятором предложенное решение обеспечивает снижение перерегулирования в 3,5 раза, сокращение времени переходного процесса на 42 % и уменьшение интегральной квадратичной ошибки в три раза [4, с. 19-20]. Кроме того, адаптивный регулятор сохраняет устойчивость и приемлемое качество управления при изменении коэффициента усиления объекта на 25 % и варьировании времени запаздывания в полуторном диапазоне. Практическая значимость работы заключается в возможности внедрения разработанного алгоритма в существующие системы автоматизации промышленных печей без замены контроллерного оборудования, что позволяет повысить энергоэффективность и качество выпускаемой продукции. Дальнейшие исследования могут быть направлены на распространение предложенного подхода на многозонные печи с перекрестными связями [2].

Список литературы:

1. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – 5-е изд. – Санкт-Петербург: Профессия, 2022. – 752 с.
2. Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления. Предиктивные регуляторы для объектов с запаздыванием / А. Р. Гайдук, А. Д. Семенов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – Т. 24, № 5. – С. 227–234.
3. Smith, O. J. M. A controller to overcome dead time / O. J. M. Smith // ISA Journal. – 1959. – Vol. 6, No. 2. – P. 28–33.
4. Нгуен, В. Т. Сравнительный анализ ПИД- и предиктивных регуляторов в задачах управления температурой / В. Т. Нгуен, А. В. Козлов // Автоматизация в промышленности. – 2024. – № 8. – С. 14–20.
5. Абдуллин, И. Ф. Адаптивное управление тепловыми объектами с запаздыванием на основе эталонной модели / И. Ф. Абдуллин, Р. Р. Каримов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2025. – Т. 17, № 1. – С. 55–64.

Примечание. При написании статьи были применены технологии искусственного интеллекта.

© Минькина А. К., 2026

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛЕЙ ЗА СЧЁТ ГЛУБОКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

студент **Жабров Егор Дмитриевич**,

науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент

Качан Светлана Аркадьевна,

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассматриваются потери теплоты с уходящими дымовыми газами на теплоэлектроцентралях и их влияние на показатели работы котлоагрегатов. Показано, что при существующих режимах эксплуатации часть теплового потенциала топлива не используется и удаляется с продуктами сгорания. Проведена оценка возможностей снижения данных потерь при применении конденсационных теплоутилизаторов.

Ключевые слова: теплоэлектроцентраль, дымовые газы, потери теплоты, утилизация теплоты, конденсационные теплоутилизаторы, КПД, расход топлива, теплоснабжение.

INCREASING THE EFFICIENCY OF COMBINED HEAT AND POWER PLANTS THROUGH DEEP UTILIZATION OF FLUE GASES HEAT

Student **Zhabrov Egor Dmitrievich**,

Academic Advisor: PhD in Engineering, Associate Professor

Kachan Svetlana Arkadieva,

Belarusian National Technical University,

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The paper considers heat losses with flue gases at combined heat and power plants and their impact on boiler performance. It is shown that under typical operating conditions part of the fuel heat is not utilized and leaves the boiler with exhaust gases. The potential for reducing these losses through the use of condensing heat recovery systems is assessed.

Keywords: combined heat and power plant, flue gases, heat losses, heat recovery, condensing heat exchangers, efficiency, fuel consumption.

Потери теплоты с уходящими дымовыми газами q_2 формируют значительную часть энергетического небаланса котлоагрегатов теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) и напрямую влияют на коэффициент полезного действия и удельные расходы топлива. Потери q_2 определяются энтальпией продуктов сгорания на выходе из газоходов, то есть температурой уходящих газов t_{yx} , коэффициентом избытка воздуха α_{yx} , составом топлива и гидродинамическими характеристиками потока [1]. При этом повышение температуры дымовых газов t_{yx} или увеличение

коэффициента избытка воздуха α_{yx} приводит к росту массового расхода продуктов сгорания и средней теплоёмкости газовой смеси, что сопровождается увеличением тепловых потерь.

Актуальность снижения потерь q_2 для условий Республики Беларусь и Российской Федерации обусловлена структурой и возрастом действующего парка теплоэлектроцентралей. Значительная часть ТЭЦ была введена в эксплуатацию в 1970 – 1990-е годы. При этом модернизация оборудования в большинстве случаев носила локальный характер и не предусматривала глубокой утилизации теплоты. В результате t_{yx} сохраняется на уровне, близком к базовым проектным значениям, что говорит о наличии неиспользованного теплового потенциала, степень вовлечения которого может варьироваться в зависимости от конкретной станции и режима её работы.

Для энергоустановок, работающих на природном газе, величина тепловых потерь q_2 составляет, как правило, порядка 4 – 7 % от располагаемой теплоты топлива для котлов средней мощности 10 – 200 МВт, для угольных установок – около 6 – 9 %, а при неблагоприятных режимах горения может достигать 10 – 11 % [2].

Значения t_{yx} определяются конструктивной схемой котла и наличием систем теплоутилизации. В базовых схемах $t_{yx} = 110 – 160$ °С для природного газа и $t_{yx} = 130 – 180$ °С для угля [3], при этом реальные значения нередко смещаются к верхней части диапазона. Ограничение по снижению t_{yx} связано с риском низкотемпературной коррозии и необходимостью обеспечения устойчивой тяги.

При работе котла без утилизации $t_{yx} = 150$ °С соответствует потерям теплоты на уровне 7 – 8 %, тогда как при снижении t_{yx} до примерно 40 – 55 °С с использованием конденсационного теплоутилизатора потери уменьшаются до 3 – 4 %. То есть возврат тепловой энергии может достигать 4 – 5 % от теплоты топлива и определяется режимом работы установки и параметрами теплоносителя, в качестве которого на ТЭЦ используется обратная сетевая вода.

Значительная часть потерь q_2 связана с наличием водяного пара, образующегося при сгорании водорода топлива. Так, при полном сгорании 1 кг метана образуется около 2,25 кг водяного пара [4]. Удельная теплота парообразования составляет 2257 кДж/кг при температуре 100 °С и возрастает до 2350 – 2400 кДж/кг в диапазоне 40 – 60 °С [4]. Температура точки росы дымовых газов для природного газа обычно находится в диапазоне 52 – 60 °С и может изменяться в зависимости от коэффициента избытка воздуха и влагосодержания продуктов сгорания [3]. При температуре газов выше точки росы водяной пар покидает котёл в перегретом состоянии, и его скрытая теплота парообразования не используется. Это определяет значительный потенциал повышения эффективности при использовании конденсационных технологий.

Теоретический потенциал утилизации скрытой теплоты парообразования g определяется разностью между высшей и низшей теплотой сгорания топлива и для природного газа составляет порядка 8 – 10 % [5].

Глубина использования скрытой теплоты определяется коэффициентом избытка воздуха и температурой обратной сетевой воды t_{oc} . При $\alpha_{yx} \leq 1,15$ и температуре теплоносителя $t_{oc} = 30 – 45$ °С суммарный возврат энергии за счёт

утилизации составляет порядка 5 – 7 %, в отдельных случаях достигая 8 % от низшей теплоты сгорания топлива [5]. Увеличение коэффициента избытка воздуха до $\alpha_{yx} = 1,25 - 1,3$ приводит к росту массового расхода дымовых газов и снижению температуры точки росы, что уменьшает долю конденсируемого водяного пара и снижает эффективность утилизации. При температуре обратной сетевой воды выше 60 °С конденсация существенно ограничивается.

На рисунке 1 представлена схема утилизации, где извлечение теплоты происходит как за счёт охлаждения газов, так и за счёт конденсации водяного пара. Дымовые газы направляются в контактный теплообменник, где охлаждаются при взаимодействии с циркулирующей водой.

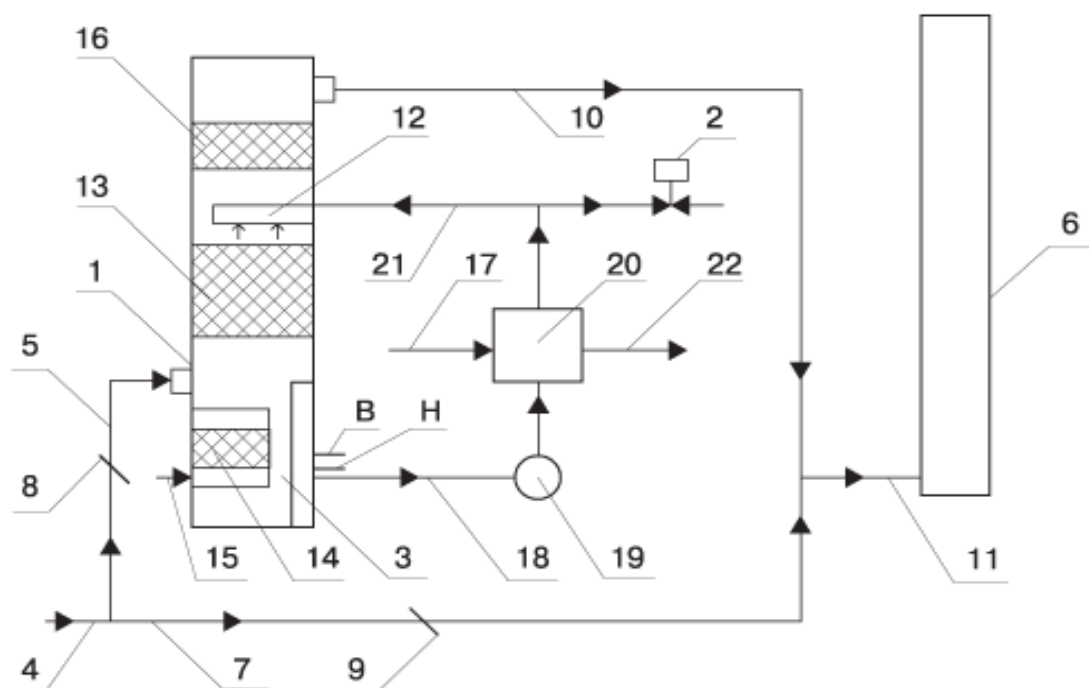


Рисунок 1. Схема установки утилизации теплоты дымовых газов:

- 1 – контактный теплообменник; 2 – система отвода конденсата; 3 – бак оборотной воды; 4 – дымовые газы от котла; 5 – поток газов на утилизацию; 6 – дымовая труба; 7 – байпасный поток газов; 8, 9 – регулирующие задвижки; 10 – охлаждённые дымовые газы; 11 – смешанный поток газов; 12 – распылитель воды; 13 – насадка теплообменника; 14 – декарбонизатор; 15 – подача воздуха; 16 – каплеуловитель; 17 – подача холодной воды; 18 – нагретая обратная вода; 19 – насос; 20 – пластинчатый теплообменник; 21 – охлаждённая вода; 22 – нагретая сетевая вода [6]

При снижении температуры ниже точки росы начинается конденсация водяного пара. Образующийся конденсат удаляется, а нагретая вода используется в системе теплоснабжения.

Интенсивность тепло- и массообмена определяется характеристиками насадки, коэффициентом орошения и температурным напором, причём в реальных условиях данные параметры могут изменяться в достаточно широких пределах, что требует их оптимизации при проектировании.

Эффективность схемы определяется параметрами системы теплоснабжения.

Для условий Республики Беларусь и Российской Федерации с температурными графиками теплосети 130/70 °С и 150/70 °С потенциал конденсационной утилизации в зимний период ограничен высокой температурой t_{oc} . Переход к пониженным температурным графикам (110/70 °С, 95/70 °С и ниже) увеличивает продолжительность работы в режимах, благоприятных для утилизации скрытой теплоты парообразования [4].

В межотопительный период температура обратной сетевой воды снижается до $t_{oc} = 40 - 55$ °С, а в отдельных случаях до $t_{oc} = 35 - 45$ °С, что обеспечивает устойчивую конденсацию водяного пара без нарушения теплового графика потребителей [4].

Зарубежный опыт подтверждает эффективность такой утилизации.

На электростанции Vuosaari Power Plant (компания Helen Oy) реализована схема с конденсацией и использованием теплового насоса. В результате температура уходящих газов снижается до 20 – 40 °С, а дополнительная тепловая мощность составляет 60 – 70 МВт. При этом коэффициент использования теплоты топлива достигает 120 – 122 % по низшей теплоте сгорания, что обусловлено использованием скрытой теплоты конденсации водяного пара [7].

Отметим, что достижение таких показателей возможно при наличии развитых низкотемпературных тепловых сетей, и прямое применение данного решения в условиях ТЭЦ Республики Беларусь и Российской Федерации требует адаптации. В частности, ключевым фактором является температура обратной сетевой воды.

Аналогичные решения реализованы на теплоэнергетическом комплексе A2A в г. Brescia, где внедрение конденсационного теплоутилизатора позволило увеличить энергетическую эффективность установки с примерно 84 % до значений, близких к 100 % по низшей теплоте сгорания топлива [6].

Сопоставление зарубежных и отечественных условий показывает, что при снижении температуры уходящих газов до 40 °С и ниже возможно увеличение КПД на 5 – 8 процентных пунктов по сравнению с базовыми схемами [8].

Конденсационные теплоутилизаторы выполняются в поверхностном или контактном исполнении. Поверхностные аппараты обеспечивают разделение продуктов сгорания и теплоносителя стенкой теплообменника. Контактные аппараты характеризуются более интенсивным тепло- и массообменом, они обеспечивают более глубокую утилизацию теплоты, однако требуют более сложной системы очистки конденсата. Поверхностные теплоутилизаторы отличаются большей надёжностью и простотой эксплуатации, но имеют меньшую интенсивность теплообмена.

Охлаждение дымовых газов сопровождается изменением их физических свойств, прежде всего плотности и удельного объёма, что отражается на аэродинамических характеристиках. В результате изменяются скорости потока и сопротивление отдельных участков газового тракта, а это, как правило, требует корректировки режимов работы дымососов. При существенном снижении температуры газов возникает необходимость проверки соответствия характеристик тягодутьевого оборудования новым условиям эксплуатации.

Отметим также, что образующийся при охлаждении конденсат обладает коррозионной активностью, что обуславливает необходимость применения коррозионностойких материалов или защитных покрытий.

Удельные капитальные затраты на внедрение конденсационных теплоутилизаторов для мощных котлов находятся в диапазоне 50 – 200 €/кВт дополнительной тепловой мощности. Снижение удельного расхода топлива на 3 – 8 %, то есть примерно на 5 – 10 г у.т./ (кВт·ч) обеспечивает срок окупаемости около 3 – 6 лет [8]. Конкретные значения зависят от стоимости топлива, режимов работы оборудования и продолжительности эксплуатации установки в условиях, благоприятных для конденсации.

В заключение отметим, что снижение расхода топлива приводит к сокращению выбросов CO₂ и оксидов азота, что улучшает экологические показатели работы ТЭЦ.

Список литературы:

1. Кузнецов, В. М. Теплотехнические расчёты котлов / В. М. Кузнецов, Э. Я. Козин. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 360 с.
2. ГОСТ 30735-2001. Котлы водогрейные. Общие технические условия: издание официальное. – Москва: Стандартинформ, 2002. – 24 с.
3. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. – *Luxembourg: Publications Office of the European Union*, 2017. – 1000 p. – URL: <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/large-combustion-plants> (date accessed: 20.03.2026).
4. Ривкин, С. Л. Основы теплотехники / С. Л. Ривкин. – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.
5. Михеев, М. А. Основы теплопередачи и термодинамики / М. А. Михеев. – Москва: Энергия, 1977. – 344 с.
6. Flue gas heat recovery systems in district heating applications // *ScienceDirect*. – URL: <https://www.sciencedirect.com> (date accessed: 20.03.2026).
7. Vuosaari Power Plant heat recovery solutions. // *Helen Oy*: [сайт]. – URL: <https://www.helen.fi/> (date accessed: 20.03.2026).
8. Energy efficiency in CHP and district heating. – *Paris: International Energy Agency*, 2020. – URL: <https://www.iea.org> (date accessed: 20.03.2026).

© Жабров Е. Д., 2026

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

студент **Диже Александра Андреевна**,
науч. руководитель: ассистент **Никешин Владислав Геннадьевич**,
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий
и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена применению искусственного интеллекта для автоматизированной диагностики промышленного оборудования. Рассмотрены технологии интернета вещей и Edge AI, обеспечивающие переход к прогностическому обслуживанию. Описаны контактные и бесконтактные методы диагностики, а также подходы на основе нейронных сетей. Приведены примеры внедрения на российских предприятиях: «Умный локомотив» (РЖД), АСПД «ЕвроСибЭнерго-Гидрогенерация», робот-рентгенолог АО «Мосгаз».

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, прогностическое обслуживание, интернет вещей (IoT), Edge AI, периферийный искусственный интеллект, диагностика оборудования, промышленное оборудование, нейронные сети, бесконтактные методы диагностики, предиктивная аналитика, компьютерное зрение.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR THE AUTOMATED DIAGNOSIS OF INDUSTRIAL EQUIPMENT

Student **Dizhe Aleksandra Andreevna**,
Academic Advisor: Assistant Lecturer **Nikeshin Vladislav Gennadievich**,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. This article focuses on the application of artificial intelligence for the automated diagnosis of industrial equipment. It examines Internet of Things (IoT) and Edge AI technologies that facilitate the transition to predictive maintenance. It describes contact and non-contact diagnostic methods, as well as approaches based on neural networks. Examples of implementation at Russian enterprises are provided: «Smart Locomotive» (Russian Railways), ASPD «EuroSibEnergo-HydroGeneration» and the radiology robot at JSC «Mosgaz».

Keywords: artificial intelligence, machine learning, predictive maintenance, Internet of Things (IoT), Edge AI, peripheral artificial intelligence, equipment diagnostics, industrial equipment, neural networks, non-contact diagnostic methods, predictive analytics, computer vision.

Современное промышленное производство ежедневно сталкивается с рядом вызовов. Один из них – жесткая система управления, завязанная на заранее заданный алгоритм работы. Однако в реальных условиях возникает все больше ситуаций, которые не были предусмотрены изначально. Возникает необходимость научить систему адаптироваться к изменяющимся условиям. Нейронные сети способны строить прогнозы, опираясь на накопленные данные. Сегодня промышленность находится на пороге новой технологической революции.

Одним из ключевых направлений этой трансформации становится внедрение систем машинного обучения и глубокого анализа данных. Они позволяют перейти от реактивного обслуживания (ремонт после поломки) и превентивного (планово-предупредительный ремонт) к прогностическому обслуживанию. Это означает, что оборудование самостоятельно сигнализирует о своем состоянии задолго до возникновения критического отказа.

Такой подход становится возможным благодаря технологиям интернета вещей. Появляется возможность отслеживать состояние объекта ежесекундно и оперативно реагировать на любые изменения. Данные со всего предприятия стекаются в единое облако, где мощные модели обучаются на больших массивах информации, постоянно повышая точность прогнозов и адаптируясь к новым сценариям работы.

Интернет вещей (IoT) представляет собой концепцию, подразумевающую объединение физических объектов, различных устройств и систем в единую сеть, где они могут обмениваться данными и взаимодействовать между собой [1]. В наши дни технологии IoT открывают широкие возможности для преобразования производства, повышения продуктивности процессов и внедрения новых решений. Ключевая мысль заключается в том, что оборудование, которое ранее не было связано с сетью, обретает «интеллектуальные» функции и получает возможность передавать информацию через интернет.

Смысл IoT сводится к сбору информации с различных датчиков и последующему ее использованию для выработки решений, усовершенствования рабочих процессов и предоставления новых сервисов. Среди ключевых преимуществ IoT – автоматизация действий, управление на расстоянии и доступ к информации в режиме реального времени. Устройства оперативно передают сведения о своих параметрах, функционировании и событиях, что позволяет специалистам незамедлительно реагировать на изменения.

Еще один важный аспект – доступ к информации в режиме реального времени. Устройства оперативно передают сведения о своих параметрах, функционировании и событиях, что позволяет специалистам незамедлительно реагировать на изменения и принимать обоснованные решения на основе актуальных данных. Это особенно востребовано в промышленности, где непрерывный мониторинг оборудования помогает предотвращать внеплановые простои и повышать производительность.

Использование IoT направлено на повышение информированности о реальном состоянии производственного оборудования (станков, аддитивных установок), что позволяет увеличивать производительность. В состав системы

входят устройства сбора данных (УСД), беспроводная сенсорная сеть (WSN, от англ. – Wireless Sensor Network) и облачный сервер [2]. УСД подключаются к датчикам, установленным на каждом станке, выполняют предварительную обработку сигналов и передают информацию через WSN на шлюз. Схема состава системы IoT представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. Схема состава системы IoT

Несмотря на кажущуюся универсальность облачных решений, их применение в промышленности сталкивается с объективными ограничениями. Централизованная обработка огромных массивов данных, поступающих ежесекундно от сотен датчиков, требует высокой пропускной способности каналов связи и вносит неизбежные задержки. Кроме того, передача критически важной информации о состоянии оборудования за пределы предприятия поднимает вопросы информационной безопасности. В связи с этим классическая облачная модель не всегда является оптимальной, что приводит к необходимости поиска альтернативных подходов. В частности, облачные вычисления обладают рядом недостатков, таких как низкая скорость вычислений и недостаточная безопасность. В связи с этим получила развитие технология Edge AI (периферийный искусственный интеллект).

Edge AI представляет собой подход, при котором обработка информации и выполнение алгоритмов искусственного интеллекта осуществляются непосредственно на периферийных устройствах без участия удаленных облачных серверов [3]. Благодаря этому IoT-устройства функционируют с более высокой скоростью, большей автономностью и эффективностью. В классических IoT-системах данные с устройств передаются в облако, где обрабатываются, после чего результат отправляется обратно. Edge AI исключает этот промежуточный этап, поскольку анализ данных производится прямо на устройстве или на локальном сетевом узле. К примеру, интеллектуальная камера с Edge AI не передает весь видеопоток в облако, а самостоятельно выявляет подозрительную активность и моментально реагирует.

Алгоритм функционирует непосредственно на контроллере или промышленном шлюзе, расположенном вблизи оборудования. Это обеспечивает минимальную задержку отклика (латентность) и повышает сохранность данных. Подобное решение оптимально для ответственных агрегатов, где критична каждая

секунда простоя. Обработка нейросетей в рамках Edge AI ведется локально с использованием данных с сенсоров самого устройства, что дает ряд преимуществ [4]. Во-первых, таким устройствам не требуется постоянное подключение к сети для передачи всех данных на внешние вычислительные мощности, что существенно ускоряет обработку – разница в скорости между облачным и бортовым вычислением может достигать двадцатикратной величины. Кроме того, возрастает устойчивость работы устройства за счет снижения зависимости от внешних факторов. Во-вторых, открывается возможность принятия решений в режиме реального времени, позволяя считывать телеметрические данные с большей частотой. Вместе с тем у Edge AI существуют определенные ограничения, которые пока не позволяют применять данный подход повсеместно.

Рассматривая некоторые методы диагностики оборудования, можно увидеть, что для диагностирования применяются контактные и бесконтактные методы.

Контактные методы диагностики оборудования предполагают прямой физический контакт датчика или прибора с поверхностью объекта для выявления дефектов, измерения параметров (толщины, вибрации, температуры) и оценки остаточного ресурса. К основным методам относятся ультразвуковой контроль, вихретоковый метод, вибродиагностика, магнитопорошковый метод, а также тепловизионный контроль контактных соединений. Большинство контактных методов, которые требуют участия человека, постепенно заменяются удаленными системами.

Бесконтактные методы могут основываться на анализе инфракрасного спектра, акустических и виброакустических измерениях [5]. Признаки, на которых обучается модель, формируются за счет извлечения данных из характеристик спектральной плотности мощности, а не амплитуд отдельных частот сигнала. Помимо акустических методов, выявлять дефекты возможно с помощью анализа данных, полученных со SCADA, с применением алгоритмов машинного обучения. Например, оценивать состояние объекта можно, анализируя различные значения на кривой мощности, разбивая данные на кластеры с помощью метода k-средних и определяя оптимальное количество кластеров методом локтя (elbow method), который находит нужное число кластеров в зависимости от дисперсии. Таким образом, данные со SCADA проходят первичную обработку и очистку от выбросов, затем признаковое пространство будущей модели сужается за счет определения статистически значимых параметров (метод Борута, статистические методы и др.). Далее данные поступают в конвейер обучения, где определяются оптимальные параметры модели. В результате выбирается лучшая модель с точки зрения прогнозирования искомого параметра, например, температуры масла в коробке передач, так как при возникновении неисправности и связанные с этим колебания различных показателей могут служить ранним признаком неисправности.

Помимо акустического, вибрационного и визуального методов, возможно выявление дефектов с помощью комбинации снимков оборудования и акустических сигналов. Такие данные обладают явной пространственной и временной составляющими, что делает их удобными для интерпретации сверточными и рекуррентными нейронными сетями. Акустические сигналы могут быть преобразованы в спектрограмму с помощью оконного преобразования Фурье

и затем переданы в модель. Кроме того, объем собранных акустических данных можно увеличивать за счет таких приемов, как смещение по времени, временное растяжение, добавление гауссовского шума и др. Результат преобразования аудиосигнала в спектрограмму представлен на рисунке 2.

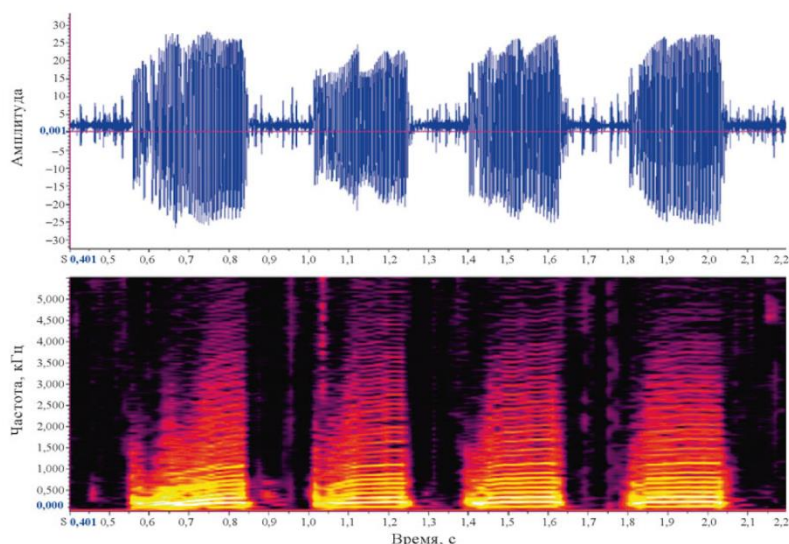


Рисунок 2. Преобразование аудиосигнала в спектрограмму

Далее рассматриваются примеры внедрения технологий в российской промышленности.

Ключевой проект ОАО «РЖД» – система «Умный локомотив», которая анализирует более 300 параметров по 23 видам оборудования, выявляет около 60 категорий сбоев и обнаруживает до 100 тыс. потенциальных поломок за год (за месяц до их возникновения) [6]. Наиболее перспективным направлением является разработка прескриптивных систем диагностирования с созданием цифровых двойников поездов (например, для «Ласточки»), которые не только прогнозируют отказы, но и дают рекомендации по их предотвращению.

ООО «ЕвроСибЭнерго-Гидрогенерация» применяет автоматизированную систему предиктивной диагностики (АСПД) с ИИ, которая собирает огромный массив данных с гидроагрегатов, анализирует работу оборудования и прогнозирует вероятность отказа. Технология определяет оптимальное время для технического обслуживания, повышает безопасность и эффективность работ [7].

Компания АО «Мосгаз» использует робота-рентгенолога на базе технологии компьютерного зрения. Данная система, использующая ИИ, осуществляет анализ стыков внутри трубы, проведение которого необходимо перед пуском газа по новому трубопроводу. Система способна автоматически сканировать и анализировать изображения, выявляя потенциальные проблемы, такие как трещины, коррозия и другие дефекты [7].

В условиях высокой динамики промышленного производства и усложнения технологических процессов традиционные подходы к управлению оборудованием, основанные на жёстко заданных алгоритмах и планово-предупредительных ремонтах, перестают отвечать требованиям эффективности и надёжности. Переход от реактивного и превентивного обслуживания к прогностическому становится не

просто технологическим трендом, а объективной необходимостью, позволяющей минимизировать внеплановые простои, снижать эксплуатационные затраты и повышать безопасность производственных объектов.

Ключевую роль в этом переходе играют технологии интернета вещей, обеспечивающие непрерывный сбор данных с распределённых датчиков и их консолидацию в единых вычислительных средах. Однако практическое применение классических облачных архитектур выявило их ограничения: высокая латентность, зависимость от пропускной способности каналов связи и риски, связанные с передачей критически важной информации за пределы предприятия. В ответ на эти вызовы формируется подход Edge AI, переносящий обработку данных и выполнение алгоритмов искусственного интеллекта непосредственно на периферийные устройства – промышленные шлюзы, контроллеры и интеллектуальные датчики. Такой подход обеспечивает минимальное время отклика, повышает автономность систем и уровень информационной безопасности, что особенно важно для ответственных агрегатов, где задержка в принятии решения может привести к серьёзным последствиям.

Эффективность прогностических систем во многом определяется выбором методов диагностики и способов извлечения информативных признаков. Наряду с традиционными контактными методами (вибродиагностика, ультразвуковой, вихретоковый контроль) всё большее распространение получают бесконтактные технологии, основанные на анализе акустических сигналов, инфракрасного спектра и данных SCADA. Применение методов машинного обучения, включая кластеризацию, отбор значимых параметров и использование свёрточных и рекуррентных нейронных сетей позволяет выявлять скрытые закономерности и формировать высокоточные прогнозы состояния оборудования. Особый интерес представляет комбинирование разнородных данных (например, снимков и акустических сигналов), что открывает возможности для создания более устойчивых и информативных моделей диагностики.

Результативность рассмотренных подходов подтверждается практикой внедрения на российских промышленных предприятиях. Опыт ОАО «РЖД» с системой «Умный локомотив», АО «Мосгаз» с роботом-рентгенологом, а также проекты ООО «ЕвроСибЭнерго-Гидрогенерация» демонстрируют, что применение технологий искусственного интеллекта и прогностической аналитики позволяет не только своевременно обнаруживать дефекты, но и переходить к прескриптивному управлению – формированию рекомендаций по оптимальному режиму обслуживания и эксплуатации оборудования.

Таким образом, формирование промышленных систем нового поколения требует комплексного подхода, объединяющего распределённую сенсорную инфраструктуру, методы периферийной обработки данных (Edge AI) и гибридные алгоритмы диагностики на основе машинного обучения. Дальнейшее развитие в этом направлении будет связано с созданием полноценных цифровых двойников производственных объектов, расширением номенклатуры диагностируемых параметров, повышением интерпретируемости моделей искусственного интеллекта, а также с интеграцией прогностических систем в единые цифровые платформы управления предприятием. Решение этих задач позволит не только

повысить эффективность и надёжность оборудования, но и сформировать основу для устойчивого развития промышленности в условиях цифровой трансформации.

Список литературы:

1. Утегенов, Н. Б. Интернет вещей (IoT) и информационные системы / Н. Б. Утегенов // *Universum: технические науки*. – 2023. – № 7-1 (112). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/internet-veschey-iot-i-informatsionnye-sistemy>.
2. Добрынин, С. Л. Мониторинг и предиктивная аналитика технологического оборудования на базе промышленного интернета вещей / С. Л. Добрынин, В. Л. Бурковский // *Вестник ВГТУ*. – 2020. – № 5. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/monitoring-i-prediktivnaya-analitika-tehnologicheskogo-oborudovaniya-na-baze-promyshlennogo-interneta-veschey>.
3. Кузнецова, Э. М. Синергия интернет-вещей и искусственного интеллекта / Э. М. Кузнецова, М. Р. Хамидуллин // *Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник научных статей 8-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых*. – Курск: Университетская книга, 2025. – С. 160-163.
4. Попов В. Edge AI: контроль производственных установок / В. Попов // *Открытые системы. СУБД*. – 2019. – № 4. – С. 24-27.
5. Величко, А. И. Алгоритмы компьютерного зрения и искусственного интеллекта для детекции дефектов на энергетическом оборудовании и объектах трубопроводного транспорта / А. И. Величко, Д. А. Балашов, А. И. Герасимов // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. – 2024. – № 1. – С. 139-146.
6. Рыжова, Е. Л. Применение информационных технологий в системах диагностирования оборудования электроподвижного состава – методы, примеры их реализации, перспективы развития / Е. Л. Рыжова // *Интеллектуальная электротехника*. – 2021. – № 1. – С. 35-42.
7. Эффективные отечественные практики применения технологий искусственного интеллекта в сфере топливно-энергетического комплекса / АНО «Цифровая экономика». – Москва, 2025. – URL: <https://d-economy.ru/analitic/jeffektivnye-otechestvennye-praktiki-primenenija-tehnologij-iskusstvennogo-intellekta-v-sfere-toplivno-jenergeticheskogo-kompleksa/>.

© Диже А. А., 2026

ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ РОЕМ РОБОТОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СКЛАДСКИХ КОМПЛЕКСАХ

аспирант **Шепелев Александр Михайлович**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент **Мишин Алексей Владимирович**,
Автономная некоммерческая организация высшего образования
«Московский университет «Синергия»,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматриваются ключевые проблемы и методологические подходы к управлению роем роботов в автоматизированных складских комплексах. Актуальность исследования обусловлена стремительным ростом электронной коммерции и увеличением масштабов применения робототехнических систем на складах ведущих мировых и российских компаний. Целью работы является систематизация существующих проблем координации роевых робототехнических систем и сравнительный анализ основных методологических подходов к их управлению. На основе обзорно-аналитического метода и сравнительного анализа выявлены типичные проблемы координации и навигации роботов в условиях высокой плотности агентов, включая проблемы коллизий, дедлоков, масштабирования и коммуникационных ограничений. Проведён сравнительный анализ централизованных, децентрализованных и гибридных подходов к управлению. Рассмотрены алгоритмы планирования траекторий, методы координации в мультиагентных системах и перспективы применения биоинспирированных алгоритмов. Сформулированы рекомендации по выбору подхода в зависимости от масштаба и специфики складского комплекса, определены направления будущих исследований.

Ключевые слова: рой роботов, управление роем, автоматизированный склад, мультиагентные системы, планирование траекторий, складская логистика, MAPF, роевой интеллект.

PROBLEMS AND METHODOLOGICAL APPROACHES TO ROBOT SWARM MANAGEMENT IN AUTOMATED WAREHOUSE COMPLEXES

Postgraduate Student **Shepelev Alexandr Mikhailovich**,
Academic Advisor: PhD in Engineering, Associate Professor
Mishin Alexey Vladimirovich,
Autonomous Non-profit Organization of Higher Education
«Moscow University «Synergy»,
Moscow, Russian Federation

Abstract. The article discusses the key problems and methodological approaches to managing a swarm of robots in automated warehouse complexes. The relevance of the research is due to the rapid growth of e-commerce and the increasing use of robotic

systems in warehouses of leading global and Russian companies. The aim of the work is to systematize the existing problems of coordination of swarm robotic systems and a comparative analysis of the main methodological approaches to their management. Based on the review and analytical method and comparative analysis, typical problems of robot coordination and navigation in conditions of high agent density, including problems of collisions, deadlocks, scaling, and communication constraints, have been identified. A comparative analysis of centralized, decentralized, and hybrid management approaches has been conducted. Trajectory planning algorithms, coordination methods in multi-agent systems, and prospects for the use of bioinspired algorithms are considered. Recommendations are formulated on the choice of approach depending on the scale and specifics of the warehouse complex, and the directions of future research are determined.

Keywords: swarm of robots, swarm management, automated warehouse, multi-agent systems, trajectory planning, warehouse logistics, MAPF, swarm intelligence.

Современная складская логистика переживает период глубокой трансформации, обусловленной стремительным ростом электронной коммерции и повышением требований потребителей к скорости доставки заказов. По данным аналитических агентств, глобальный рынок роевой робототехники оценивается в 2,04 млрд долларов США в 2026 году с прогнозируемым ростом до 9,72 млрд долларов к 2033 году при среднегодовом темпе роста 25 % [1]. При этом сегмент логистики и складского хозяйства занимает наибольшую долю рынка – около 29,5% [1]. Компания Amazon к 2024 году развернула более одного миллиона роботов в своей операционной сети [2], что свидетельствует о масштабности происходящих изменений.

Степень изученности проблемы управления роями роботов в складских системах неоднородна. В мировой науке активно развиваются исследования в области мультиагентного планирования траекторий (Multi-Agent Path Finding, MAPF) [3, 4], алгоритмов координации роевых систем [5] и биоинспирированных методов управления [6]. В российской научной литературе проблематика роевого управления представлена в работах, посвящённых мультиагентным системам [7], робототехнике и технической кибернетике [8], однако прикладные исследования, ориентированные непосредственно на складскую логистику, остаются относительно немногочисленными.

Целью настоящей статьи является систематизация проблем управления роем роботов в автоматизированных складских комплексах и сравнительный анализ основных методологических подходов к их решению. Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи: определить специфику функционирования роевых систем на складах; выявить типичные проблемы координации и навигации; провести анализ реальных кейсов внедрений; систематизировать и сравнить существующие подходы к управлению роями.

Методологическую основу исследования составляют обзорно-аналитический метод и сравнительный анализ. Информационной базой послужили публикации в ведущих научных журналах и материалах конференций (IEEE, ACM, Springer), а также отраслевые аналитические отчёты.

Под роем роботов в контексте складской логистики понимается группа автономных мобильных роботов, функционирующих в едином рабочем

пространстве и координирующих свои действия для выполнения общих логистических задач — транспортировки товаров, сортировки, комплектации заказов и перемещения грузов между зонами склада [5, 9]. Принципиальное отличие роевого управления от классической автоматизации, основанной на конвейерных системах или AGV (Automated Guided Vehicles) с фиксированными маршрутами, заключается в отсутствии жёстко заданной инфраструктуры перемещения и в способности системы к самоорганизации [6].

Ключевыми характеристиками роевых робототехнических систем выступают: масштабируемость — возможность наращивания числа агентов без кардинальной перестройки системы управления; отказоустойчивость — способность системы сохранять работоспособность при выходе из строя отдельных агентов; самоорганизация — формирование упорядоченного коллективного поведения на основе локальных взаимодействий без централизованного планирования [5, 10].

В складских роевых системах задействованы различные типы роботов. Системы goods-to-person обеспечивают доставку стеллажей с товарами к операторам-комплектовщикам. Сортировочные роботы осуществляют распределение товаров по направлениям отгрузки. Транспортные роботы перемещают паллеты и контейнеры между функциональными зонами склада [2, 11]. Интеграция гетерогенных флотов роботов в единую систему управления представляет собой отдельную научно-техническую задачу [12].

Проблема коллизий и дедлоков (взаимных блокировок) является одной из наиболее критичных при высокой плотности роботов на складе. Дедлок возникает, когда два или более робота блокируют пути друг друга, и ни один из них не может продолжить движение без перемещения другого [3]. В реальных складских условиях, где плотность роботов может достигать нескольких единиц на 10 квадратных метров, вероятность возникновения таких ситуаций существенно возрастает.

Динамическое перепланирование маршрутов в реальном времени представляет значительную трудность. В отличие от статических задач планирования, складская среда является высокодинамичной: постоянно появляются новые заказы, изменяется расположение товаров, часть роботов направляется на зарядку [4]. Время отклика системы планирования должно составлять доли секунды, что накладывает жёсткие ограничения на вычислительную сложность используемых алгоритмов.

Проблема масштабирования проявляется в экспоненциальном росте вычислительной сложности при увеличении числа агентов. Задача MAPF является NP-трудной в общем случае [3], и нахождение оптимального решения для сотен и тысяч роботов оказывается вычислительно неприемлемым в рамках требований реального времени. Коммуникационные ограничения — задержки передачи данных, потери пакетов, ограниченная пропускная способность беспроводных каналов — дополнительно осложняют координацию [13].

Проблема «узких мест» (bottleneck) в зонах погрузки и разгрузки обусловлена тем, что определённые участки склада — входные/выходные зоны, станции комплектации, зоны зарядки — являются точками концентрации потоков роботов, что провоцирует заторы и снижает общую пропускную способность системы [9].

Вопросы энергоэффективности и планирования зарядки также требуют учёта при управлении роём, поскольку необходимость периодической зарядки аккумуляторов вносит дополнительные ограничения в задачу планирования [14].

Компания Amazon Robotics (ранее – Kiva Systems, приобретённая Amazon в 2012 году за 775 млн долларов) является крупнейшим оператором складских роботов в мире. К 2024 году компания развернула более одного миллиона роботов, использующих не менее восьми различных робототехнических систем, включая системы Sequoia, Proteus, Cardinal и Sparrow [2]. Архитектура управления Amazon Robotics является преимущественно централизованной с элементами локальной автономии, однако известные ограничения включают сложность масштабирования единого управляющего модуля и зависимость от стабильности центрального сервера [11].

Компании Geek+ и GreyOrange представляют азиатский сегмент рынка складской робототехники. GreyOrange разработала платформу GreyMatter – систему управления складскими операциями (WES) с модулем мультиагентной оркестрации (MAO), обеспечивающим координацию гетерогенных флотов роботов различных производителей в режиме реального времени [12]. Geek+ внедрила системы goods-to-person на складах в более чем 30 странах, применяя гибридный подход к координации.

Таблица 1. Сравнительный анализ подходов к управлению роём роботов

Критерий	Централизованный	Децентрализованный	Гибридный
Масштабируемость	Низкая (ограничена мощностью центрального узла)	Высокая (линейный рост нагрузки)	Средняя / Высокая (зависит от архитектуры)
Отказоустойчивость	Низкая (единая точка отказа)	Высокая (деградация плавная)	Средняя (зависит от уровня отказа)
Оптимальность решений	Высокая (глобальный оптимум)	Низкая (локально оптимальные решения)	Средняя (близкие к оптимальным)
Вычислительная сложность	Высокая (экспоненциальный рост)	Низкая (распределённые вычисления)	Средняя (распределение нагрузки)
Задержка реакции	Средняя / Высокая (зависит от нагрузки)	Низкая (локальные решения)	Низкая / Средняя
Сложность реализации	Средняя	Высокая (проектирование локальных правил)	Высокая (интеграция уровней)

Российский опыт автоматизации складов развивается ускоренными темпами. Компания Wildberries в 2024 году инвестировала в создание собственного конструкторского бюро и внедрение роботов для транспортирования стеллажей, роботизированных погрузчиков и промышленных роботов с машинным зрением [15]. Компании Ozon и Сбер также реализуют проекты по роботизации логистических центров, хотя масштаб внедрений пока уступает зарубежным

аналогам. Несмотря на значительный прогресс, нерешёнными остаются проблемы координации гетерогенных флотов, оптимального планирования при высокой плотности агентов и обеспечения отказоустойчивости в масштабе тысяч роботов.

В таблице 1 представлен сравнительный анализ подходов к управлению роем роботов.

Централизованный подход предполагает наличие единого управляющего сервера, обладающего полной информацией о состоянии всех агентов и среды. Все решения о маршрутах, распределении задач и разрешении конфликтов принимаются центральным узлом. К преимуществам данного подхода относятся возможность нахождения глобально оптимальных решений и простота обеспечения согласованности действий агентов. Однако существенные недостатки включают наличие единой точки отказа, ограниченную масштабируемость вследствие полиномиально или экспоненциально растущей вычислительной нагрузки, а также зависимость от надёжности и пропускной способности коммуникационных каналов [5, 10].

Децентрализованный подход основан на принципе автономного принятия решений каждым роботом на основе локальной информации и ограниченного взаимодействия с соседними агентами. Преимуществами являются высокая отказоустойчивость, масштабируемость и робастность. Недостатки включают субоптимальность глобального решения, сложность обеспечения глобальной согласованности и потенциальное возникновение нежелательных эмерджентных эффектов [6, 10].

Гибридный подход представляет собой иерархическую архитектуру, сочетающую глобальное планирование с локальной автономией. Как правило, верхний уровень иерархии осуществляет стратегическое распределение задач и укрупнённое планирование, тогда как нижний уровень обеспечивает локальное планирование траекторий и реактивное избегание препятствий [9, 12]. Платформа GreyMatter компании GreyOrange и система управления Amazon Robotics являются примерами гибридных архитектур [2, 12].

Классические алгоритмы поиска кратчайших путей – A^* , D^* и их модификации – составляют основу планирования траекторий отдельных агентов. Алгоритм A^* использует эвристическую оценку для эффективного поиска кратчайшего пути на графе; его модификации для пространственно-временных графов позволяют учитывать динамические препятствия. Алгоритм D^* и его варианты обеспечивают эффективное перепланирование при изменении среды. Алгоритмы на основе случайных деревьев (RRT) применяются для планирования в непрерывных пространствах конфигураций [4, 16].

Задача MAPF формулируется как задача нахождения бесконфликтных путей для множества агентов из начальных позиций в целевые.

Среди основных подходов к решению MAPF выделяется Conflict-Based Search (CBS) – двухуровневый алгоритм, в котором верхний уровень выполняет поиск по дереву конфликтов, а нижний уровень планирует пути отдельных агентов с учётом накладываемых ограничений [3]. Приоритетное планирование, при котором агенты планируют маршруты последовательно в порядке заданных приоритетов, обеспечивает более быструю, но субоптимальную работу [4].

Реактивные методы, такие как метод потенциальных полей и алгоритм ORCA (Optimal Reciprocal Collision Avoidance), обеспечивают избегание столкновений в реальном времени без глобального планирования. Метод потенциальных полей моделирует цель как притягивающий потенциал, а препятствия — как отталкивающие, однако подвержен проблеме локальных минимумов. Алгоритм ORCA обеспечивает гарантированное избегание столкновений в многоагентной среде на основе вычисления допустимых скоростей [16].

Применение обучения с подкреплением для адаптивного планирования маршрутов представляет перспективное направление. Агенты обучаются стратегиям навигации на основе опыта взаимодействия со средой и другими агентами, что позволяет адаптироваться к изменяющимся условиям без явного программирования правил поведения [17]. В складском контексте наибольшую применимость демонстрируют гибридные схемы, сочетающие глобальное планирование на основе MAPF-алгоритмов с локальным реактивным избеганием столкновений [4, 9].

Распределение задач между роботами в роевых системах осуществляется с помощью различных механизмов. Аукционные механизмы предполагают, что задачи выставляются на «торги», и каждый робот делает ставку в соответствии со своими текущими возможностями — расстоянием до точки назначения, уровнем заряда, текущей загруженностью. Методы на основе рыночных моделей и контрактных сетей обеспечивают децентрализованное распределение задач с учётом локальной информации агентов [7, 10].

Биоинспирированные алгоритмы представляют значительный интерес для управления складскими роями.

Муравьиные алгоритмы моделируют процесс нахождения кратчайших путей на основе механизма стигмергии — непрямого взаимодействия агентов через изменение среды (аналог феромонных следов).

Алгоритмы роевого интеллекта (Particle Swarm Optimization, PSO) обеспечивают коллективную оптимизацию на основе обмена информацией о найденных решениях.

Пчелиные алгоритмы моделируют распределение задач по аналогии с фуражировочным поведением пчелиных семей [6, 8]. Адаптация данных алгоритмов для складских задач предполагает отображение логистических операций на модели коллективного поведения биологических систем.

Консенсусные протоколы обеспечивают согласование действий агентов при принятии коллективных решений — например, при выборе приоритетного направления движения в зоне конфликта или согласовании порядка обработки заказов. Данные протоколы позволяют достичь согласия между агентами за конечное число итераций обмена сообщениями [13].

Технология цифровых двойников выступает как инструмент моделирования и оптимизации роевого управления. Цифровой двойник склада — виртуальная модель, воспроизводящая топологию, динамику потоков и поведение роботов — позволяет проводить симуляцию различных сценариев, тестировать алгоритмы управления и оптимизировать параметры системы до развёртывания на реальном объекте [14].

Перспективным направлением является интеграция методов машинного обучения и классических подходов. Глубокое обучение с подкреплением применяется для выработки стратегий координации, которые затем дополняются классическими алгоритмами планирования для обеспечения гарантий безопасности и полноты [17]. Комбинация нейросетевых моделей для прогнозирования нагрузки и спроса с оптимизационными алгоритмами распределения задач представляет собой ещё одно перспективное направление развития [9].

Проведённый анализ позволяет сформулировать следующие основные выводы. Управление роем роботов в автоматизированных складских комплексах сопряжено с комплексом взаимосвязанных проблем, включающих координацию и предотвращение коллизий при высокой плотности агентов, масштабирование алгоритмов управления, обеспечение коммуникационной надёжности и оптимизацию энергопотребления. Анализ реальных внедрений – от масштабных систем Amazon Robotics до развивающихся проектов российских компаний – свидетельствует о том, что указанные проблемы не имеют универсального решения и требуют адаптации подходов к специфике конкретного складского комплекса.

Сравнительный анализ методологических подходов показал, что ни один из рассмотренных подходов – централизованный, децентрализованный или гибридный – не является безусловно оптимальным. Выбор подхода определяется масштабом системы, требованиями к отказоустойчивости и временем реакции.

Для складов с числом роботов до нескольких десятков приемлем централизованный подход, обеспечивающий оптимальность решений.

При масштабировании до сотен и тысяч агентов предпочтительным становится гибридный подход, сочетающий преимущества глобального планирования и локальной автономии.

Рекомендации по выбору подхода включают следующее: для средних складов (до 50 роботов) целесообразно применять централизованные архитектуры на базе MAPF-алгоритмов; для крупных складов (50–500 роботов) – гибридные архитектуры с иерархическим планированием; для сверхкрупных объектов (свыше 500 роботов) – гибридные или децентрализованные системы с элементами роевого интеллекта.

Направления будущих исследований включают: интеграцию методов искусственного интеллекта и глубокого обучения с подкреплением для адаптивного управления роем; применение технологий граничных вычислений (edge computing) для снижения задержек в системах управления; использование сетей 5G для обеспечения высокоскоростной и надёжной коммуникации между агентами; разработку стандартизированных протоколов взаимодействия для обеспечения интероперабельности робототехнических систем; проектирование и оптимизация роевых систем на основе цифровых двойников.

Список литературы:

1. Swarm Robotics Market Size, Share & Trends Analysis Report, 2025–2032 / Coherent Market Insights. – 2025. – URL: <https://www.coherentmarketinsights.com/industry-reports/swarm-robotics-market> (дата обращения: 25.03.2026).
2. Amazon Robotics: How Amazon Deploys Over 1 Million Robots // About Amazon. – 2024. – URL: <https://www.aboutamazon.com/news/operations/amazon-robotics> (дата обращения: 25.03.2026).
3. Sharon, G. Conflict-Based Search for Optimal Multi-Agent Pathfinding / G. Sharon, R. Stern, A. Felner, N. Sturtevant // Artificial Intelligence. – 2015. – Vol. 219. – P. 40–66.
4. Stern, R. Multi-Agent Pathfinding: Definitions, Variants, and Benchmarks / R. Stern, N. Sturtevant, A. Felner [et al.] // Proceedings of the International Symposium on Combinatorial Search (SoCS). – 2019. – P. 151–158.
5. Brambilla, M. Swarm Robotics: A Review from the Swarm Engineering Perspective / M. Brambilla, E. Ferrante, M. Birattari, M. Dorigo // Swarm Intelligence. – 2013. – Vol. 7, No. 1. – P. 1–41.
6. Deepa, O. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems / O. Deepa, A. Senthilkumar // International Journal on Applications of Graph Theory In wireless Ad Hoc Networks and sensor Networks. – 2016. – Vol. 8, No. 1. – P. 9–17.
7. Городецкий, В. И. Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации / В. И. Городецкий // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2012. – № 2. – С. 92–120.
8. Каляев, И. А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
9. Wurman, P.R. Coordinating Hundreds of Cooperative, Autonomous Vehicles in Warehouses / P.R. Wurman, R. D'Andrea, M. Mountz // AI Magazine. – 2008. – Vol. 29, No. 1. – P. 9–20.
10. Yan, Z. A Survey and Analysis of Multi-Robot Coordination / Z. Yan, N. Jouandeau, A.A. Cherif // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2013. – Vol. 10, No. 12. – P. 1–18.
11. Azadeh, K. Robotized and Automated Warehouse Systems: Review and Recent Developments / K. Azadeh, R. de Koster, D. Roy // Transportation Science. – 2019. – Vol. 53, No. 4. – P. 917–945.
12. GreyOrange Recognized in 2024 Gartner® Hype Cycle™ for Mobile Robots and Drones // GlobeNewsWire. – 2024. – URL: <https://www.greyorange.com/press-release/greyorange-recognized-in-2024-gartner-hype-cycle-for-mobile-robots-and-drones/> (дата обращения: 26.03.2026).
13. Cao, Y. Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions / Y. Cao, A. Fukunaga, A. Kahng // Autonomous Robots. – 1997. – Vol. 4, No. 1. – P. 7–27.
14. Карпов, В. Э. Система моделирования поведения групп робототехнических агентов с элементами социальной организации / В. Э. Карпов, М. А. Ровбо, Е. Е. Овсянникова // Программные продукты и системы. – 2018. – Т. 31, № 3. – С. 581–590.
15. Человек плюс робот: как складские комплексы стали полигонами для новейших технологий // Forbes. – 2025. – URL: <https://www.forbes.ru/brandvoice/528524->

celovek-plus-robot-kak-skladskie-kompleksy-stali-poligonami-dla-novejsih-tehnologij
(дата обращения: 26.03.2026).

16. Van den Berg, J. Reciprocal n-Body Collision Avoidance / J. Van den Berg, S. Guy, M. Lin, D. Manocha // Robotics Research. – Springer, 2011. – P. 3–19.

17. Sartoretti, G. PRIMAL: Pathfinding via Reinforcement and Imitation Multi-Agent Learning / G. Sartoretti, J. Kerr, Y. Shi [et al.] // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2019. – Vol. 99, No. 1. – P. 1–9.

© Шепелев А. М., 2026

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ И ОТОПИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

канд. техн. наук, доцент **Гладышев Николай Николаевич**,
аспирант **Антошкин Илья Игоревич**,
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Повышение эффективности теплообмена отопительных приборов при пониженных тепловых нагрузках достигается путём поддержания максимально разрешённой температуры (90 – 95 °С), подводимой в отопительные приборы с переходом на количественное регулирование подводимого теплоносителя.

Ключевые слова: отопление, отопительные приборы, теплообмен, температурный напор, поверхность отопительных приборов, температура теплоносителя.

TEMPERATURE REGIME OF THE THERMAL NETWORK AND HEATING DEVICES

PhD in Engineering, Associate Professor **Gladyshev Nikolay Nikolaevich**,
Postgraduate Student **Antoshkin Ilya Igorevich**,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Increasing the efficiency of heat exchange of heating devices at reduced thermal loads is achieved by maintaining the maximum permitted temperature (90 – 95 °C), supplied to heating devices with the transition to quantitative regulation of the supplied coolant.

Keywords: heating, heating devices, heat exchange, temperature difference, surface of heating devices, temperature of the coolant.

Для повышения эффективности теплообмена в отопительных приборах необходимо изменить температурный режим в отопительном контуре, поддерживая температуру теплоносителя, подводимого в отопительные приборы на постоянном максимально разрешённом уровне 90–95 °С с переходом на количественное регулирование его расхода. При этом в качестве расчётного необходимо считать расход сетевой воды, отбираемый из прямого трубопровода тепловой сети при температуре $\tau_{1\text{нп}} = 95$ °С, и отводе в обратный трубопровод при температуре $\tau_{2\text{нп}} = 45$ °С. Указанные температуры теплоносителя устанавливаются в тепловой сети при температуре наружного воздуха $t_{\text{нп}}$ центрального качественного регулирования

(ЦКР). Указанная температура в обратном трубопроводе используется в системах теплоснабжения ряда Европейских стран (например, в Дании).

Сравним расчётный расход теплоносителя, соответствующий расчётной температуре наружного воздуха $t_{нр}$ для покрытия рассматриваемой тепловой нагрузки $Q_{отр}^n = 100$ кВт ($G_{свр} = 0,298$ кг/с) с расчётным расходом для покрытия тепловой нагрузки при $t_{нп}$, равным $Q_{отнп}^n = 75$ кВт.

$$G_{свнп} = \frac{Q_{отнп}^n}{C_p(\tau_{1нп} - \tau_{2нп})} = \frac{75}{4,19 \cdot (95 - 45)} = 0,357 \text{ кг/с}.$$

Полученный расход $G_{свнп}$ всего лишь на 20 % выше расчётного расхода $G_{свр}$, что свидетельствует о возможности эксплуатации трубопроводов тепловой сети при непродолжительных повышенных расходах.

Корректировка поверхности теплообмена отопительных приборов при расчётных параметрах теплоносителя $\tau_{1нп}$ и $\tau_{2нп}$ и перевод систем отопления на количественно-качественное регулирование требует изменения температурного графика сетевой воды в тепловой сети [1].

На рисунке 1 представлен температурный график изменения температуры сетевой воды в зависимости от температуры наружного воздуха при количественно-качественном регулировании отопительной нагрузки с зависимым присоединением отопительных приборов.

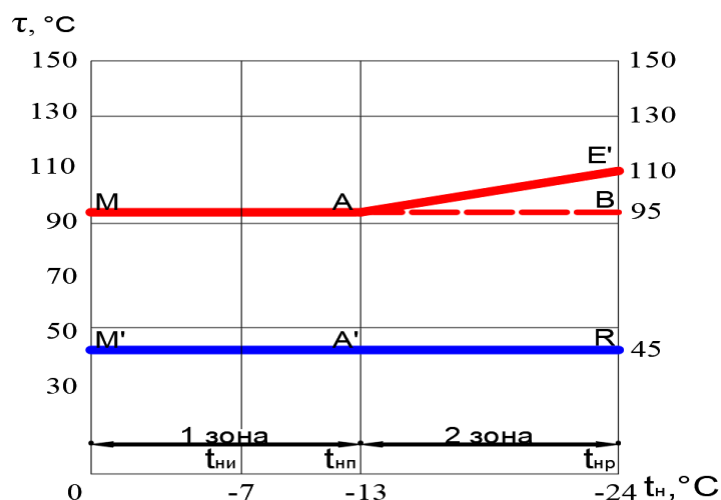


Рисунок 1. Температурный график количественного регулирования тепловой нагрузки в системах теплоснабжения с зависимым присоединением отопительных приборов

Как следует из температурного графика, теплоноситель, отбираемый из тепловой сети в первой зоне, подаётся в отопительные приборы при постоянной температуре 95 °C, что обеспечивает максимальный температурный напор в отопительных приборах и соответственно эффективный теплосъём.

Регулирование отопительной нагрузки в первой зоне осуществляется количественным способом путём изменения расхода теплоносителя в зависимости от температуры наружного воздуха t_n . Так, при повышении температуры наружного воздуха в пределах 1-ой зоны, т. е. при температурах, лежащих левее точки «А» ($t_n > t_{нп}$), расход теплоносителя, подводимого в отопительные приборы, должен снижаться

путём уменьшения проходного сечения двухходового клапана, установленного на подающем трубопроводе.

Во второй зоне расход теплоносителя, подаваемого в отопительные приборы, при понижении наружной температуры ($t_n < t_{нп}$) должен возрасти. Для этого, как в типовых схемах с зависимым присоединением систем отопления, вода из обратного трубопровода с более низкой температурой с помощью насоса на перемычке смешивается с водой, поступающей из прямого трубопровода при повышенной до 110 – 115 °С температуре, как показано на графике (рис. 2). Из чего следует, что увеличение температуры теплоносителя до указанных значений осуществляется только при температурах наружного воздуха, соответствующих второй зоне. Таким образом: если в первой зоне реализуется количественное регулирование при постоянной температуре и расходах теплоносителя ниже расчётного значения ($G_{свнп}$); то во второй зоне – количественно-качественное регулирование осуществляется при расходах выше расчётного значения за счёт подмеса.

Количественное регулирование требует изменения расхода теплоносителя, циркулирующего в тепловой сети в зависимости от температуры наружного воздуха. Такое регулирование должно производиться в источниках теплоснабжения. На рисунке 2 представлен предлагаемый график регулирования расхода сетевой воды в тепловой сети:

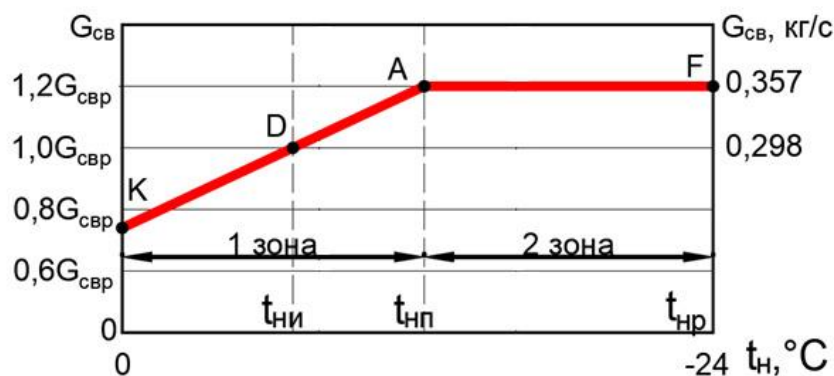


Рисунок 2. График зависимости расхода сетевой воды в тепловой сети от температуры наружного воздуха

На правой оси ординат приведены численные значения расходов теплоносителя для рассматриваемого примера тепловой нагрузки 100 кВт.

Список литературы:

1. Гладышев, Н. Н. Инновационные технологии использования тепловой и электрической энергии / Н. Н. Гладышев, О. А. Долженко // Способы повышения эффективности систем централизованного теплоснабжения ЖКХ. – СПб.: ВШТЭ СПб ГУПТД, 2025. – 141 с.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ МЕТОДОВ АППРОКСИМАЦИИ L_2 , L_1 И L_∞ К АНОМАЛЬНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ В ЗАДАЧАХ РОБОТОТЕХНИКИ

магистрант **Храмцова Олеся Сергеевна**,
магистрант **Куликов Никита Сергеевич**,
Научно-технологический университет «Сириус»,
пгт. Сириус, Российская Федерация

Аннотация. В работе выполнен сравнительный анализ трёх методов аппроксимации: наименьших квадратов (L_2), минимизации суммы модулей отклонений (L_1) и Чебышёвской аппроксимации (L_∞) – в условиях зашумлённых данных с аномальными выбросами. Исследовано влияние доли выбросов (0–50%) и их амплитуды (1–100) на точность восстановления полинома пятой степени. Проведена оценка вычислительной сложности методов.

Ключевые слова: аппроксимация, метод наименьших квадратов, метод минимизации суммы модулей отклонений, Чебышёвская аппроксимация, робастность, выбросы, вычислительная сложность, робототехника.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE STABILITY OF THE APPROXIMATION METHODS L_2 , L_1 AND L_∞ TO ANOMALOUS MEASUREMENTS IN ROBOTICS PROBLEMS

Master Student **Khramtsova Olesya Sergeevna**,
Master Student **Kulikov Nikita Sergeevich**,
«Sirius» University of Science and Technology,
Sirius, Russian Federation

Abstract. The paper provides a comparative analysis of three approximation methods: least squares (L_2), minimizing the sum of the modulus of deviations (L_1) and Chebyshev approximation (L_∞) – in noisy data with anomalous outliers. The effect of the fraction of outliers (0-50%) and their amplitude (1-100) on the accuracy of the fifth degree polynomial reconstruction is investigated. The computational complexity of the methods is estimated.

Keywords: approximation, least squares method, method of minimizing the sum of deviation modules, Chebyshev approximation, robustness, outliers, computational complexity, robotics.

В задачах робототехники обработка сигналов с датчиков является критически важным этапом, определяющим качество работы систем управления. Измерения, поступающие с сенсоров, практически всегда содержат шумы различной природы, а также могут включать аномальные выбросы, возникающие вследствие сбоев оборудования, помех связи или кратковременных внешних воздействий [1]. Выбор

метода аппроксимации, устойчивого к подобным искажениям, непосредственно влияет на точность восстановления полезного сигнала и, как следствие, на надёжность функционирования робототехнической системы.

Наиболее распространённым подходом является метод наименьших квадратов (L_2), минимизирующий сумму квадратов отклонений. Этот метод обладает аналитическим решением и высокой вычислительной эффективностью, однако чувствителен к наличию выбросов [2]. Альтернативой выступают методы, основанные на минимизации суммы модулей отклонений (L_1), которые теоретически обладают большей робастностью [3]. Особое место занимает Чебышёвская аппроксимация (L_∞), ориентированная на минимизацию максимальной абсолютной ошибки, что актуально для задач, требующих равномерного приближения [4].

Целью данной работы является количественное сравнение трёх методов аппроксимации – L_2 , L_1 и L_∞ – по следующим критериям:

- устойчивость к доле аномальных выбросов в данных;
- устойчивость к амплитуде выбросов;
- вычислительная сложность.

В отличие от существующих исследований, фокусирующихся на качественном сравнении методов, в данной работе определяются количественные пороговые значения, при которых происходит деградация каждого из подходов, что позволяет сформулировать практические рекомендации для инженерных приложений [5].

Настоящая работа выполнена в рамках образовательной деятельности по дисциплине «Численные методы решения прикладных задач робототехники».

Рассматривается задача аппроксимации функции, заданной набором измерений, полиномом пятой степени:

$$p(x) = k_5x^5 + k_4x^4 + k_3x^3 + k_2x^2 + k_1x + k_0.$$

Истинные значения полинома определены на сетке $x_i = 0,1i$, где $i = 0, \dots, 100$ (101 точка). Коэффициенты полинома подобраны таким образом, чтобы выполнялись следующие ограничения:

- $0 \leq p(x_i) \leq 5$ для всех точек x_i ;
- $p(0) \leq 1$;
- $p(3) \geq 4$;
- $p(7) \leq 1$;
- $2 \leq p(10) \leq 3$.

Эти ограничения моделируют реальные физические условия, например, ограничения на перемещение исполнительного механизма или диапазон измерений датчика.

Зашумлённые измерения формируются следующим образом:

- гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $\sigma^2 = 0,3$;
- выбросы, представляющие собой случайные значения с вероятностью p и амплитудой A , распределенной равномерно от 0 до $A_{\max}$ со случайным знаком.

Рассматриваются три метода аппроксимации:

1. Метод наименьших квадратов (L_2) – минимизация суммы квадратов отклонений:

$$x^* = \arg \min_x \|Ax - b\|_2^2$$

2. L_1 -аппроксимация — минимизация суммы модулей отклонений:

$$x^* = \arg \min_x \|Ax - b\|_1$$

3. Чебышёвская аппроксимация (L_∞) – минимизация максимальной абсолютной ошибки:

$$x^* = \arg \min_x \|Ax - b\|_\infty$$

Для количественной оценки качества аппроксимации используются три метрики:

– максимальная абсолютная ошибка:

$$- \max |y_{true} - y_{approx}|$$

– средняя абсолютная ошибка:

$$- \frac{1}{n} \sum |y_{true} - y_{approx}|$$

– среднеквадратичная ошибка:

$$\sqrt{\frac{1}{n} * \sum (y_{true} - y_{approx})^2}$$

Для исследования устойчивости методов были проведены три серии численных экспериментов в среде MATLAB с использованием пакета оптимизации YALMIP и решателя SDPT3.

В рамках первого эксперимента изучалось влияние доли выбросов на точность аппроксимации. При фиксированной амплитуде выбросов $A = 15$ доля ошибок варьировалась в диапазоне от 0 % до 50 %. Для каждой контрольной точки было выполнено по 100 симуляций, после чего полученные метрики усреднялись по всей выборке. Результаты первого эксперимента представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1. Зависимость ошибок аппроксимации от доли выбросов (RMSE)

Выбросы, %	L_2 (RMSE)	L_1 (RMSE)	L_∞ (RMSE)
0	0,1219	0,1478	0,3352
5	0,8035	0,1710	7,1424
10	1,1395	0,1728	5,3570
15	1,3619	0,1965	3,0633
20	1,5601	0,2192	1,9529
25	1,7760	0,2493	1,6466
30	1,7813	0,2954	1,0245
40	2,1438	0,4585	0,8216
50	2,5000	0,7485	0,6007

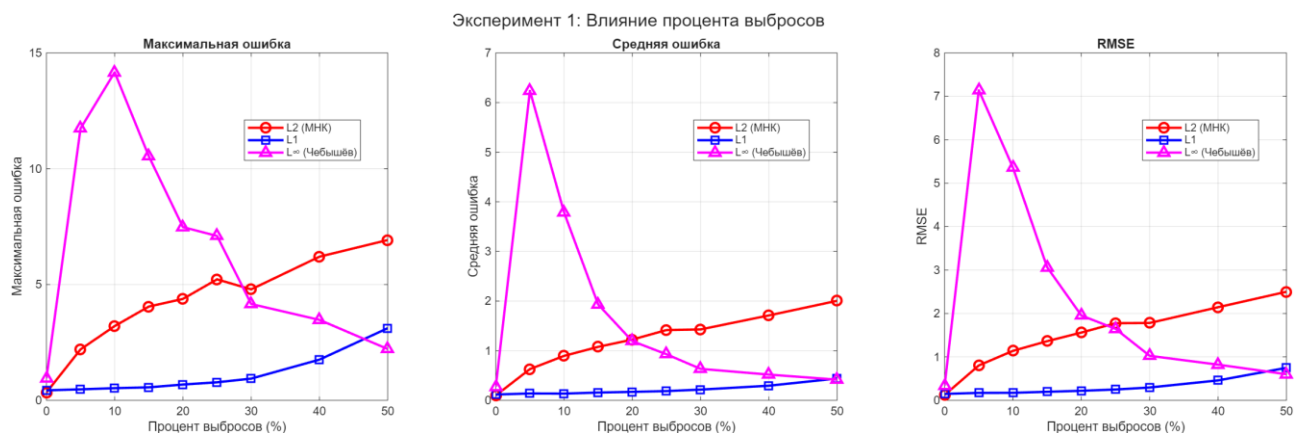


Рисунок 1. Зависимость ошибок аппроксимации от доли выбросов

В результате проведения эксперимента можно сделать следующие выводы.

1. Метод L_2 (МНК). При отсутствии выбросов (0 %) данный метод демонстрирует наилучшую точность ($RMSE = 0,122$). Однако при появлении даже минимальной доли аномалий (5 %) ошибка возрастает в 6,6 раза, а при 50 % выбросов – в 20,5 раза. Полученные данные подтверждают крайнюю чувствительность классического МНК к наличию аномальных измерений в выборке.

2. Метод L_1 . Данный метод демонстрирует наиболее высокую робастность. При увеличении доли выбросов с 0 % до 50 % значение $RMSE$ возрастает умеренно – с 0,148 до 0,749 (в 5 раз). Уже при 5 % выбросов данный метод превосходит L_2 по точности более чем в 4,7 раза.

3. Метод L_∞ . Данный метод проявляет значительную неустойчивость к помехам типа «выброс». При уровне шума в 5 % значение $RMSE$ скачкообразно увеличивается с 0,335 до 7,142 (в 21 раз). Несмотря на то, что при дальнейшем росте доли выбросов наблюдается нелинейное изменение ошибки, точность метода остается неудовлетворительной и существенно уступает показателям метода L_1 .

Во втором эксперименте оценивалось влияние амплитуды выбросов. Доля ошибок была зафиксирована на уровне 10 %, в то время как значение амплитуды изменялось в диапазоне от 1 до 100. Аналогично предыдущему этапу, для обеспечения достоверности результатов в каждой точке проводилось по 100 итераций. Результаты первого эксперимента представлены в таблице 2 и на рисунке 2.

Таблица 2. Зависимость ошибок аппроксимации от амплитуды выбросов ($RMSE$)

Амплитуда	L_2 ($RMSE$)	L_1 ($RMSE$)	L_∞ ($RMSE$)
1	0,1534	0,1841	0,4170
2	0,1953	0,1818	0,8263
3	0,2558	0,1826	1,1888
5	0,4109	0,1814	1,9093
7	0,5204	0,1775	2,7212
10	0,7652	0,1793	3,6912
15	1,1055	0,1801	5,4522
20	1,4973	0,1851	7,0485
30	2,2037	0,1900	11,3916
40	3,1383	0,1807	13,5097
50	3,5377	0,1797	17,7960
70	5,1755	0,1865	24,2027
100	7,2478	0,1769	33,0870

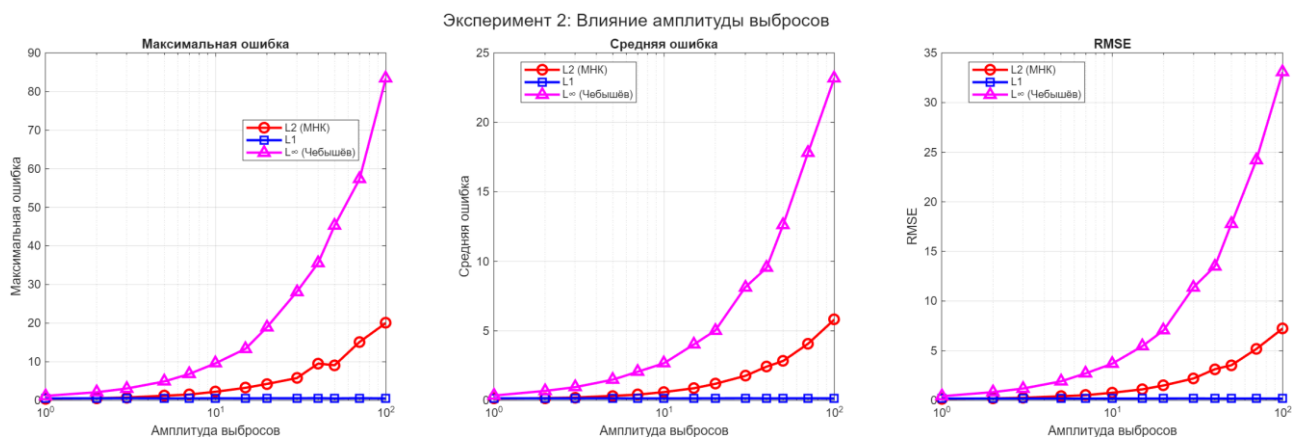


Рисунок 2. Зависимость ошибок аппроксимации от амплитуды выбросов

В результате проведения эксперимента можно сделать следующие выводы.

1. Метод L_1 демонстрирует абсолютную робастность к изменению амплитуды выбросов. При стократном увеличении амплитуды (от 1 до 100) значение RMSE остается практически неизменным, варьируясь в узком диапазоне от 0,177 до 0,184. Это подтверждает гипотезу о том, что метод эффективно инвариантен к величине одиночных аномальных измерений.

2. Метод L_2 . Величина ошибки демонстрирует линейную зависимость от амплитуды помех. При достижении амплитуды 100, показатель RMSE составляет 7,25, что в 47 раз превышает ошибку метода L_1 . Данный результат иллюстрирует прямое влияние масштаба аномалии на смещение оценки в рамках метода наименьших квадратов.

3. Метод L_∞ характеризуется наиболее интенсивным темпом роста ошибки. При амплитуде 100 значение RMSE достигает 33,09, что в 187 раз хуже показателя метода L_1 . Наблюдается критическая деградация точности аппроксимации при увеличении мощности выбросов, что делает метод непригодным для работы с зашумленными данными.

В третьем эксперименте анализировалась вычислительная сложность предложенных методов. Проводились замеры времени выполнения алгоритмов с последующим усреднением результатов по итогам 1000 повторений. Результаты третьего эксперимента представлены в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение вычислительной сложности методов

Метод	Среднее время, мс	Стандартное отклонение, мс	Отношение к L_2
L_2	0,14	0,03	1.0×
L_1	235,26	25,05	1705×
L_∞	233,34	23,48	1691×

В результате проведения эксперимента можно сделать следующие выводы.

1. Метод L_2 характеризуется минимальной вычислительной сложностью со средним временем выполнения 0,14 мс. Столь высокая производительность позволяет интегрировать данный алгоритм в системы управления реального времени с частотой дискретизации до 7 кГц.

2. Методы L_1 и L_∞ демонстрируют сопоставимые временные затраты на вычисления (порядка 235 мс), что более чем в 1700 раз превышает показатели

метода L_2 . Данная вычислительная нагрузка ограничивает применение робастных методов в высокочастотных контурах управления, однако является допустимой для прикладных задач калибровки, технической диагностики и офлайн-постобработки данных.

Полученные в ходе проведения экспериментов результаты позволяют сформулировать следующие закономерности.

Во-первых, L_1 -аппроксимация минимизирует сумму модулей отклонений. В отличие от квадратичной функции потерь, модуль не усиливает влияние больших отклонений. Как следствие, даже аномально большие выбросы не доминируют в целевой функции, что обеспечивает робастность метода [6]. Экспериментально подтверждено, что L_1 сохраняет работоспособность при любых исследованных значениях доли выбросов (до 50 %) и амплитуды (до 100).

Во-вторых, L_∞ -аппроксимация минимизирует максимальную абсолютную ошибку. При наличии даже одного выброса, существенно превышающего уровень шума, метод вынужден увеличивать амплитуду полинома, чтобы «накрыть» эту аномалию, что приводит к глобальному искажению формы восстанавливаемой зависимости. Экспериментально показано, что уже при 5 % выбросов RMSE возрастает в 21 раз, а R^2 уходит в глубоко отрицательную область, что свидетельствует о полной непригодности метода.

На основе проведенного исследования могут быть сформулированы следующие рекомендации, представленные в таблице 4.

Таблица 4. Сравнительные характеристики и рекомендации по применению методов

Критерий / Метод	L_2	L_1	L_∞
Устойчивость к выбросам	Низкая (чувствителен к $p < 5\%$)	Высокая (стабилен до $p = 50\%$)	Критически низкая
Зависимость от амплитуды A	Линейный рост ошибки	Инвариантность (стабильность)	Экспоненциальный рост ошибки
Быстродействие	Высокое (до 7 кГц)	Низкое (задержка ~235 мс)	Низкое (задержка ~235 мс)
Рекомендуемая область	Системы реального времени, фильтрация белого шума	Офлайн-обработка, калибровка при наличии аномалий	Минимизация гарантированной ошибки в чистых данных
Статус применения	Стандарт для идеальных условий	Рекомендуется для зашумленных данных	Не рекомендуется при риске выбросов

В ходе проведенного исследования выполнен сравнительный анализ методов аппроксимации в нормах L_1 , L_2 , L_∞ по критериям вычислительной сложности и устойчивости к аномальным измерениям. На основании численных экспериментов установлено, что метод L_1 -аппроксимации обладает наиболее высокой робастностью: его точность практически инвариантна к амплитуде выбросов и демонстрирует слабую зависимость от их концентрации. Так, даже при критическом уровне помех в 50 % значение RMSE возрастает лишь в 5 раз по сравнению с идеальными условиями. Однако существенным ограничением данного

подхода является высокая вычислительная трудоемкость (порядка 235 мс), что в 1700 раз превышает показатели классического МНК.

В свою очередь, метод L_2 (МНК) показал наилучшее быстродействие (0,14 мс), что подтверждает возможность его интеграции в высокочастотные системы управления реального времени. Вместе с тем выявлена его крайняя чувствительность к качеству данных: наличие всего 5 % аномальных измерений приводит к росту ошибки в 6,6 раза, а при 50 % выбросов – в 20,5 раза. Еще менее эффективным в условиях помех оказался метод L_∞ , продемонстрировавший скачкообразный рост погрешности (в 21 раз) уже при минимальном уровне зашумленности. Экспериментально доказано, что при амплитуде выбросов 100 точность Чебышёвской аппроксимации оказывается в 187 раз ниже показателей метода L_1 .

Таким образом, определены количественные пороги применимости: для алгоритмов L_2 и L_∞ деградация аппроксимации наступает уже при 5 % выбросов, тогда как метод L_1 сохраняет работоспособность во всем исследованном диапазоне. Полученные результаты позволяют рекомендовать использование L_1 -нормы для задач прецизионной калибровки и офлайн-диагностики, в то время как применение L_2 и L_∞ при наличии риска появления аномалий является неоправданным. Дальнейшее развитие работы предполагает апробацию данных закономерностей на реальных данных сенсорных систем робототехники и сравнение с альтернативными робастными подходами, такими как М-оценки Хьюбера и алгоритм RANSAC.

Список литературы:

1. Хьюбер, П. Робастность в статистке / П. Хьюбер. – М.: Мир, 1984. – 304 с.
2. Бахвалов, Н. С. Численные методы (анализ, алгебра, обыкновенные дифференциальные уравнения) / Н. С. Бахвалов. – М.: Главная редакция физ.- мат. лит. издательства «Наука», 1973. – 632 с.
3. Канторович, Л. В. Функциональный анализ / Л. В. Канторович, Г. П. Акилов. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл. редакция физико-математической литературы, 1984. – 752 с.
4. Акимов, П. А. Метод гарантирующего оценивания при калибровке блока гироскопов / П. А. Акимов, А. И. Матасов // Автоматика и телемеханика. – 2023. – № 7. – С. 41-65.
5. Костенко, Р. В. Веб-приложение многомерной регрессии на основе метода наименьших квадратов и программной библиотеки конструируемых базисов / Р. В. Костенко, Ю. В. Клинаев // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 9(129). – С. 254-266.
6. Зацепин, Д. К. L_1 -аппроксимация со степенной функцией градуирования для дробных дифференциальных уравнений с сингулярными возмущениями / Д. К. Зацепин // Системы управления, сложные системы: моделирование, устойчивость, стабилизация, интеллектуальные технологии: Материалы X Международной научно-практической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения профессора А. А. Шестакова, Елец, 17–18 апреля 2025 года. – Елец: Елецкий гос. ун-т им. И. А. Бунина, 2025. – С. 48-54.

МЕТОД ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ МАШИН НА ОСНОВЕ ВИБРАЦИОННОГО АНАЛИЗА И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ: ОБЗОР И СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ

аспирант **Силла Амаду**,

науч. руководитель: старший научный сотрудник лаборатории
информационных технологий, доцент **Бусыгин Константин Николаевич**,

Санкт-Петербургский государственный университет

промышленных технологий и дизайна,

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлен обзор методов прогнозирующего обслуживания вращающихся машин (роторного оборудования) на основе вибрационного анализа и машинного обучения. Вибрационный анализ позволяет обнаруживать дефекты по вибрационным сигналам и статистическим показателям, таким как СКЗ и эксцесс. Машинное обучение позволяет классифицировать дефекты и автоматизировать диагностику. Результаты анализа показывают, что сочетание этих методов позволяет повысить надежность машин и снизить простои.

Ключевые слова: прогнозирующее обслуживание, вращающиеся машины, вибрационный анализ, машинное обучение, диагностика дефектов.

METHOD OF PREDICTIVE MAINTENANCE OF ROTATING MACHINES BASED ON VIBRATION ANALYSIS AND MACHINE LEARNING: REVIEW AND STRUCTURE OF THE DIAGNOSTIC SYSTEM

Postgraduate Student **Sylla Amadou**,

Academic Advisor: Senior Researcher at the Laboratory of Information
Technologies, Associate Professor **Konstantin Nikolaevich Busygin**,

St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,

St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article provides an overview of methods for predictive maintenance of rotating machines (rotating equipment) based on vibration analysis and machine learning. Vibration analysis makes it possible to detect defects using vibration signals and statistical indicators such as RMS and kurtosis. Machine learning allows classifying defects and automating diagnostics. The analysis results show that combining these methods improves machine reliability and reduces downtime.

Keywords: predictive maintenance, rotating machines, vibration analysis, machine learning, fault diagnostics.

1. Введение

Вращающиеся машины широко используются в промышленности и играют важную роль в современных производственных системах [1]. Их остановка может привести к значительным экономическим потерям. Поэтому вопросы обслуживания играют важную роль в современной промышленности.

Существует три основных типа обслуживания: корректирующее, профилактическое и прогнозирующее. Корректирующее обслуживание заключается в ремонте машины после поломки. Профилактическое обслуживание заключается в проведении вмешательства через регулярные интервалы. Но эти два подхода уже не устраивают промышленность. Прогнозирующее обслуживание заключается в мониторинге состояния машины и проведении вмешательства только тогда, когда это необходимо.

Сегодня промышленность все чаще использует прогнозирующее обслуживание. Потому что этот метод позволяет снизить затраты, избежать незапланированных остановок и увеличить срок службы машин [2].

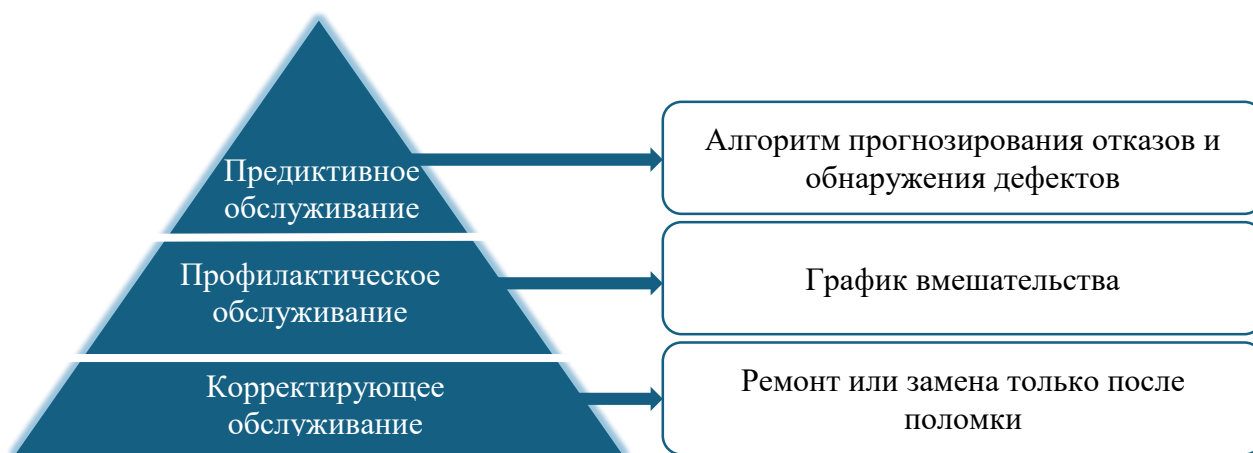


Рисунок 1. Типы промышленного обслуживания (корректирующее, профилактическое, прогнозирующее)

Прогнозирующее обслуживание использует несколько типов сигналов: вибрации, температуру, акустику, электрический ток. Среди этих сигналов можно сказать, что вибрационный анализ является наиболее используемым методом для вращающихся машин. Машины естественным образом генерируют вибрации. Когда появляется дефект, вибрационный сигнал немедленно меняется. Анализируя эти изменения, мы можем определить причину проблемы.

Именно появление алгоритмов машинного обучения (machine learning) меняет дело. Они могут обрабатывать большие объемы вибрационных данных. Они сами учатся распознавать образы дефектов. Это делает диагностику более быстрой и надежной.

2. Почему вибрационный анализ?

Вибрации являются отличным индикатором состояния здоровья вращающейся машины. Каждый дефект генерирует специфический для него вибрационный образ. Например, изношенный подшипник производит удары на точных частотах. Среди различных методов мониторинга вибрационный анализ является наиболее используемым методом для вращающихся машин. Мы сказали, что все вращающиеся машины производят вибрации. Когда появляется дефект, уровень вибрации меняется. Вибрационный анализ будет заключаться в измерении и анализе этих вибраций для определения причины проблемы [3].

Используемые датчики называются акселерометрами, они размещаются на опорах машины. Вибрационный сигнал затем записывается системой сбора данных.

Существует три метода анализа вибрационного сигнала во временной, частотной или временно-частотной области:

- для временного анализа (ударная волна): мы наблюдаем сигнал во времени. Благодаря этому мы представляем эволюцию амплитуды (ускорения, скорости или перемещения) в зависимости от времени;
- для частотного анализа (спектр): мы используем преобразование Фурье (БПФ). Это позволяет разложить временной сигнал на спектральные составляющие. Каждый пик соответствует определенной частоте, связанной с конкретным дефектом (дисбаланс, расцентровка, зубчатые колеса);
- для временно-частотного анализа (спектрограмма): мы используем STFT (кратковременное преобразование Фурье) или вейвлет. Он позволяет визуализировать эволюцию частот во времени. Он необходим для анализа нестационарных сигналов, например, на этапах пуска или останова вращающейся машины.

Частотный анализ является наиболее используемым, поскольку каждый дефект производит определенную характерную частоту [4].

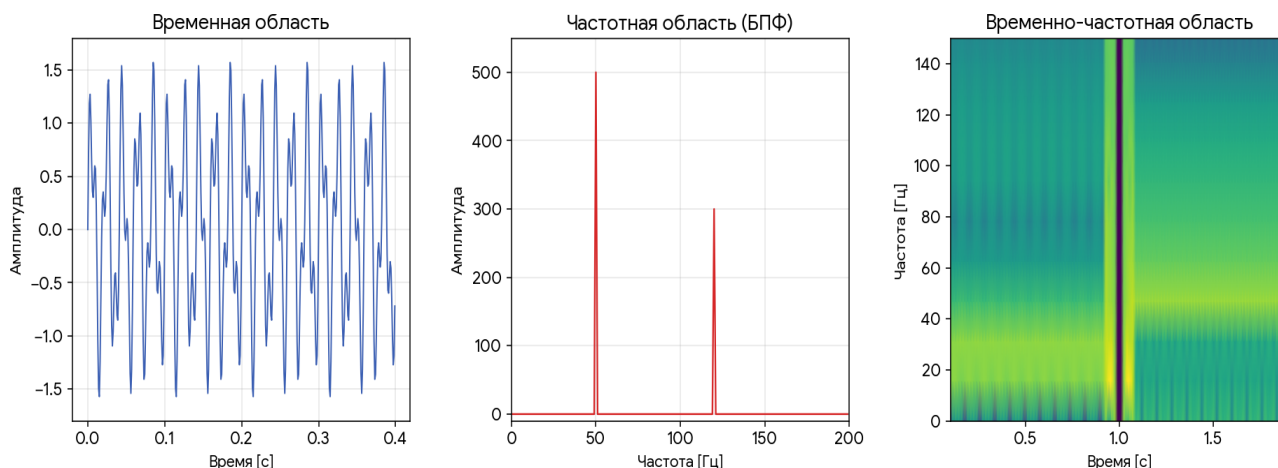


Рисунок 2. Три области анализа вибрационного сигнала (время, частота, время-частота)

3. Основные дефекты вращающихся машин

Вращающиеся машины часто работают в тяжелых условиях и в течение очень долгого времени. Тепло, пыль, влажность или механические удары ускоряют их износ. Перечислим наиболее частые дефекты:

- дефекты подшипника: износ, трещины и т. д.;
- дисбаланс: может возникнуть неравномерное распределение масс вокруг оси;
- расцентровка: валы могут быть не соосны друг с другом;
- механический люфт: слишком большая подвижность деталей;
- дефекты зубчатой передачи: износ зубьев, трещины, поломка;
- дефекты ремней или шкивов.

Вибрационная сигнатура, специфичная для дефекта дисбаланса, создает вибрацию на частоте вращения. Расцентровка создает вибрацию на удвоенной частоте вращения. Дефекты подшипников являются одними из наиболее частых дефектов во вращающихся машинах. Эти дефекты создают характерные частоты, которые могут быть обнаружены в вибрационном спектре [5].

4. Статистические показатели в вибрационном анализе

Для анализа вибраций используются статистические показатели. Эти показатели называются «признаками» (features) в машинном обучении. Наиболее используемыми показателями являются: СКЗ (RMS), эксцесс (kurtosis), коэффициент асимметрии (skewness), пик-фактор (crest factor), дисперсия (variance), пиковое значение (peak value).

СКЗ позволяет измерить энергию, содержащуюся в сигнале. Эксцесс – обнаружить удары. Пик-фактор указывает на наличие пиков, а коэффициент асимметрии указывает на асимметрию сигнала.

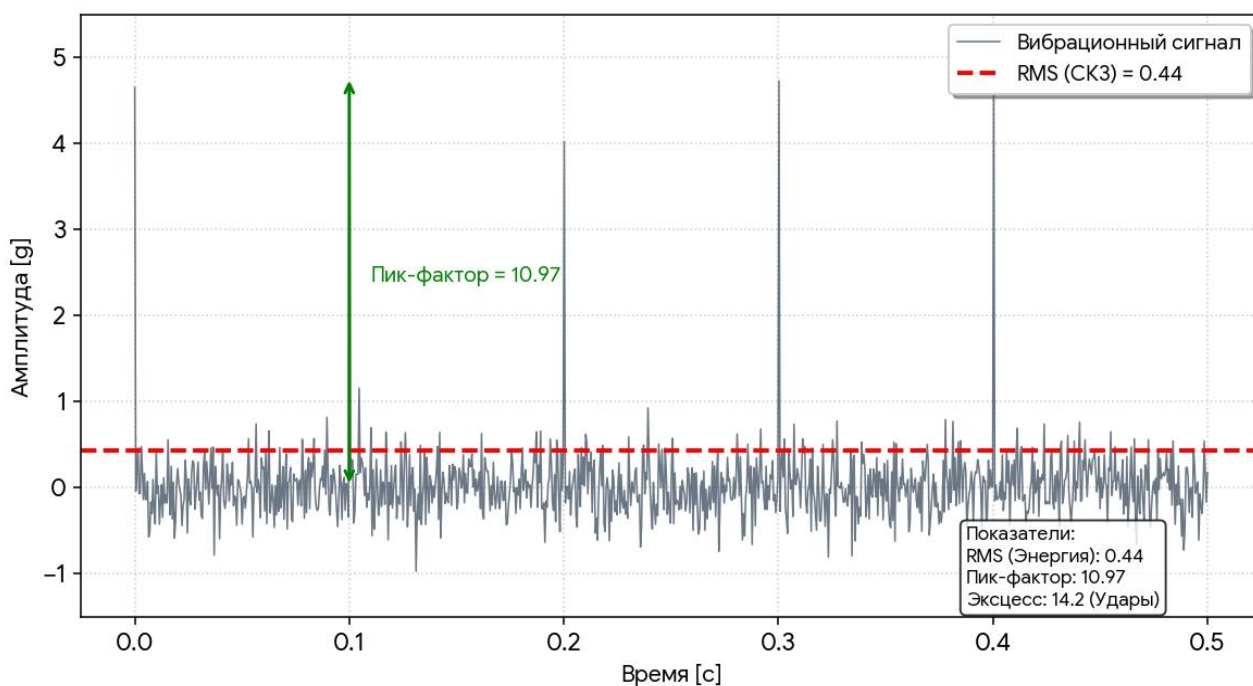


Рисунок 3. Пример статистических показателей, извлеченных из вибрационного сигнала

Эти показатели широко используются для обнаружения дефектов в подшипниках и зубчатых передачах [6]. Они используются как входные данные для алгоритмов машинного обучения.

5. Каковы ограничения классического вибрационного анализа?

Его проблема в том, что он сильно зависит от мнения эксперта. Хорошая интерпретация спектров требует большого опыта. Кроме того, современные машины производят много данных. Поэтому трудно анализировать эти данные вручную. Именно из-за этой проблемы используется машинное обучение. Машинное обучение позволяет автоматически обнаруживать дефекты и классифицировать состояние машины.

Дуэт, образованный вибрационным анализом и машинным обучением, является взаимодополняющим. Этот дуэт сегодня является очень распространенным методом для прогнозирующего обслуживания вращающихся машин.

6. Что такое машинное обучение?

Мы скажем, что машинное обучение – это метод анализа данных. Он позволяет машине самостоятельно учиться на основе предоставленных ей данных. Исходя из этого, машина сможет затем принимать решения без явного программирования.

Машинное обучение сегодня широко используется в прогнозирующем обслуживании для обнаружения и классификации дефектов [7]. Принцип прост. Мы измеряем вибрации. Мы извлекаем показатели. Мы отправляем эти показатели в алгоритм, который учится распознавать дефекты.

7. Представление общей структуры системы диагностики

Структура системы диагностики, основанной на машинном обучении, состоит из определенного количества этапов: Сбор данных; Предварительная обработка сигнала; Извлечение и выбор показателей или характеристик; Классификация или Моделирование; Принятие решения. Рисунок 4 ниже представляет операционный поток системы прогнозирующего обслуживания, от сбора необработанных данных через датчики до действия по принятию решения.



Рисунок 4. Общая структура системы прогнозирующего обслуживания

7.1. Сбор данных

Данные получаются через серию акселерометрических датчиков, установленных на машине. Качество и количество данных очень важны для диагностики. Они напрямую влияют на результат.

7.2. Предварительная обработка сигнала

Сигнал, измеренный датчиками, содержит шум, что делает его использование неэффективным. Его необходимо отфильтровать, чтобы получить сигнал лучшего качества. Можно использовать фильтры нижних частот, верхних частот или полосовые. Однако метод предварительной обработки варьируется в зависимости от сигнала и целевого результата.

7.3. Извлечение характеристик

Из предварительно обработанного сигнала извлекаются показатели состояния. Эти показатели будут классифицированы путем расчета процента. Они могут быть: временными (СКЗ, эксцесс, коэффициент асимметрии...), частотными (амплитуда частот), временно-частотными (вейвлеты).

7.4. Выбор характеристик

Не все показатели полезны. Некоторые показатели плохо разделяют дефекты. Поэтому необходимо отобрать наиболее важные показатели посредством ранжирования.

Наиболее используемыми методами являются: корреляционный анализ, PCA (анализ главных компонент) ...

7.5. Классификация

Классификация является наиболее важным этапом процесса. Именно здесь алгоритм учится распознавать и различать дефекты в зависимости от характеристик сигнала. Наиболее используемыми алгоритмами являются SVM, KNN, Random Forest и искусственные нейронные сети [8].

7.6. Принятие решения

На основе алгоритма система указывает состояние машины: здоровое состояние (работает нормально), дефект подшипника, дефект расцентровки, дефект дисбаланса, дефект зубчатой передачи. Система также может предсказать время до поломки. Рисунок ниже иллюстрирует, как алгоритм (например, SVM или Random Forest) группирует данные датчиков в отдельные кластеры. Каждая группа представляет определенное состояние здоровья.

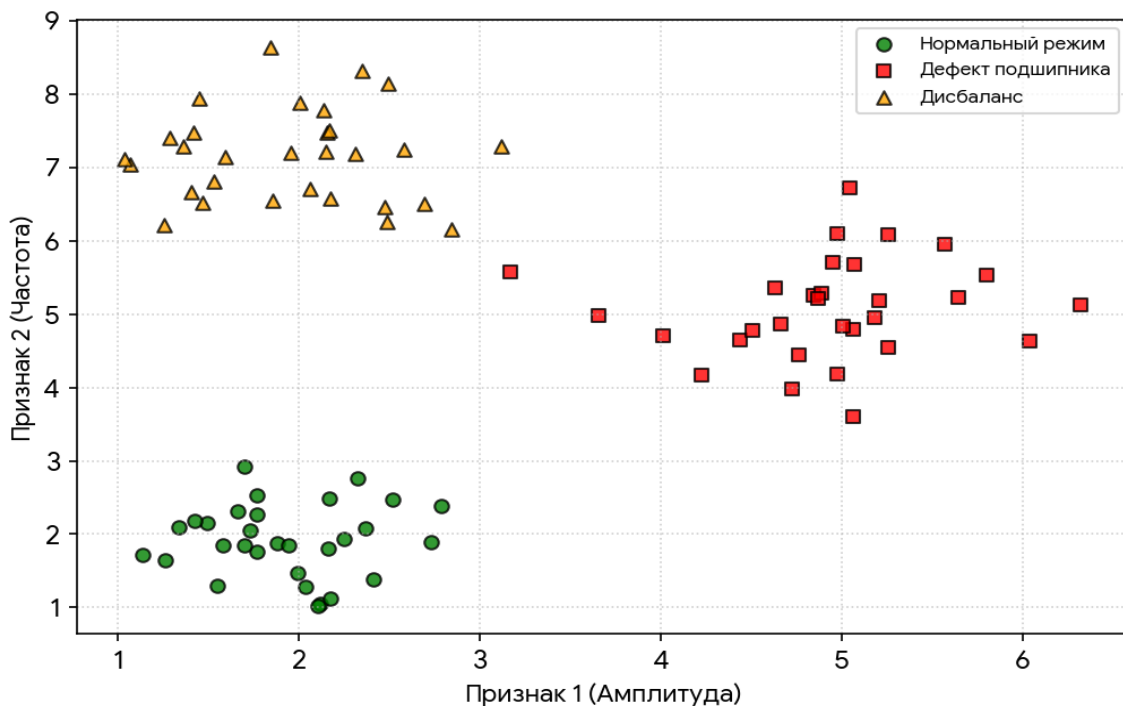


Рисунок 5. Пример результата классификации дефектов

8. Обучение с учителем и без учителя

Существует два типа машинного обучения.

8.1. Обучение с учителем

При этом методе данные размечены. Состояние машины уже известно. Алгоритм учится на этих данных. Пример: данные вибрации – здоровое состояние, данные вибрации – дефект подшипника, данные вибрации – дефект расцентровки. Алгоритмы с учителем являются наиболее используемыми в диагностике, потому что они более точны.

8.2. Обучение без учителя

В этом методе данные не размечены. Алгоритм должен найти группы в данных. Этот метод применяется в основном при полном отсутствии данных о поломках или для обнаружения аномалий без диагностики. Наиболее используемыми методами для этой задачи являются: К-средних, иерархическая кластеризация, DBSCAN.

9. Базы данных, используемые в исследованиях

Для разработки или тестирования алгоритмов исследователи используют чаще всего общедоступные базы данных. Наиболее используемыми базами данных являются базы данных подшипников.

Самые известные публичные базы данных:

- CWRU (Case Western Reserve University) [9].
- IMS Bearing Dataset [10].
- Paderborn University [11].
- MFPT Dataset

Следует отметить, что все эти базы содержат вибрационные сигналы с различными дефектами. Они также служат для сравнения различных методов и различных алгоритмов.

10. Каковы ограничения машинного обучения

Как и любая система, машинное обучение также имеет ограничения:

- Ему нужно много данных и особенно хорошо сбалансированных данных;
- Он имеет риски переобучения, трудность интерпретации моделей и использования в реальном времени [12].

Для противодействия этим проблемам сегодня используются глубокое обучение и Интернет вещей (IoT) [13].

11. Заключение

В статье мы представили обзор прогнозирующего обслуживания вращающихся машин на основе вибрационного анализа и машинного обучения. Вращающиеся машины незаменимы в промышленности. Их поломка может привести к значительным экономическим потерям при неконтролируемых остановках. Чтобы избежать этих проблем, промышленность сегодня внедряет прогнозирующее обслуживание.

Мы объяснили, что вибрационный анализ позволяет контролировать состояние машин. Каждый дефект создает собственную и специфическую вибрацию. Анализируя эти вибрации во временной, частотной и временно-частотной областях, становится возможным обнаруживать дефекты до их появления. Мы также представили статистические показатели, такие как СКЗ, эксцесс, коэффициент асимметрии и пик-фактор. Эти показатели позволяют охарактеризовать состояние машины.

Затем мы представили машинное обучение. Это метод, который позволяет автоматически анализировать вибрационные данные. Мы представили все этапы системы диагностики (сбор данных, предварительная обработка сигналов, извлечение характеристик, выбор характеристик, классификация и принятие решения). Мы также представили наиболее используемые алгоритмы, такие как SVM, KNN, Random Forest и нейронные сети.

Проведенный анализ показывает, что вибрационный анализ и машинное обучение являются взаимодополняющими. Их комбинация позволяет повысить точность диагностики и автоматизировать обнаружение дефектов.

Для будущих работ будет интересно интегрировать глубокое обучение, Интернет вещей и мониторинг в реальном времени. Эти технологии еще больше улучшат системы прогнозирующего обслуживания и позволят развивать Индустрию 4.0.

12. Приложение: Пример кода Matlab (Предварительная обработка и извлечение характеристик)

```
%% 1. Конфигурация параметров
fs = 20000;
windowSize = 4096;
overlap = 0.5;
step = floor(windowSize * (1 - overlap));
% Определение классов дефектов
classes = {'Normal', 'Inner_Race', 'Outer_Race', 'Ball_Fault'};
```

```

%% 2. Имитация загрузки сигналов (2 секунды на состояние)
t = 0:1/fs:2;
data_raw.Normal = 0.2 * randn(size(t));
data_raw.Inner_Race = 0.5 * randn(size(t)) + 3*sin(2*pi*150*t);
data_raw.Outer_Race = 0.4 * randn(size(t)) + 2*sin(2*pi*80*t);
data_raw.Ball_Fault = 0.3 * randn(size(t)) + 1.5*sin(2*pi*220*t);
dataset = []; % Инициализация итоговой таблицы
%% 3. Цикл предобработки по каждому классу
fprintf('Начало обработки данных...\n');
for i = 1:numel(classes)
    label = classes{i};
    raw_signal = data_raw.(label);
    % ЭТАП: DETREND (Удаление постоянной составляющей/тренда)
    sig_detrended = detrend(raw_signal);
    % ЭТАП: ФИЛЬТРАЦИЯ (ФНЧ Баттерворта 4-го порядка, отсечка 10 Гц
    [b, a] = butter(4, 10/(fs/2), 'high');
    sig_filtered = filtfilt(b, a, sig_detrended);
    % ЭТАП: НОРМАЛИЗАЦИЯ (Z-масштабирование: среднее 0, откл. 1)
    sig_normalized = (sig_filtered - mean(sig_filtered)) / std(sig_filtered);
    % ЭТАП: СЕГМЕНТАЦИЯ (Разбиение на окна)
    num_samples = length(sig_normalized);
    num_segments = floor((num_samples - windowSize) / step) + 1;
    for j = 1:num_segments
        start_idx = (j-1)*step + 1;
        end_idx = start_idx + windowSize - 1;
        segment = sig_normalized(start_idx:end_idx);
        % ЭТАП: ИЗВЛЕЧЕНИЕ ПРИЗНАКОВ (Features)
        feat_rms = sqrt(mean(segment.^2));
        feat_kurt = kurtosis(segment);
        feat_peak = max(abs(segment));
        feat_crest = feat_peak / feat_rms;
        % Формирование строки данных
        new_row = table(feat_rms, feat_kurt, feat_crest, {label}, ...
            'VariableNames', {'RMS', 'Kurtosis', 'CrestFactor', 'Тип_Дефекта'});
        dataset = [dataset; new_row];
    end
end
%% 4. Завершение и экспорт датасета
dataset.Fault_Type = categorical(dataset.Fault_Type);
dataset = dataset(randperm(height(dataset)), :);
% Вывод результатов в консоль
fprintf('Предобработка завершена.\n');
fprintf('Всего сегментов в датасете: %d\n', height(dataset));
disp(head(dataset)); % Показать первые 5 строк
% Сохранение для Classification Learner
save('bearing_diagnostic_dataset.mat', 'dataset');
%% 5. РАСШИРЕННЫЙ АНАЛИЗ И ПРОВЕРКА ДАННЫХ
%% 5.1 БПФ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ФИЛЬТРАЦИИ (Сравнение до/после на примере 'Inner_Race')
% Берем последний обработанный сигнал из цикла (sig_filtered) и исходный (raw_signal)
N = length(raw_signal);
f_axis = (0:N/2-1)*(fs/N);
fft_raw = abs(fft(detrend(raw_signal))/N);
fft_proc = abs(fft(sig_filtered)/N);

figure('Name', 'Проверка фильтрации');
subplot(2,1,1);
plot(f_axis, fft_raw(1:N/2));
title('Спектр до фильтрации'); grid on;
ylabel('Амплитуда');

subplot(2,1,2);
plot(f_axis, fft_proc(1:N/2));
title('Спектр после фильтрации (ФВЧ 10 Гц)'); grid on;

```

```

xlabel('Частота (Гц)'); ylabel('Амплитуда');

%% 5.2 ДИАГРАММЫ «ЯЩИК С УСАМИ» (BOXPLOTS)
% Визуализация распределения признаков по типам дефектов
figure('Name', 'Статистический анализ (Boxplot)');
subplot(1,2,1);
boxplot(dataset.Kurtosis, dataset.Fault_Type);
title('Распределение Эксцесса (Kurtosis)'); grid on;
ylabel('Значение');

subplot(1,2,2);
boxplot(dataset.RMS, dataset.Fault_Type);
title('Распределение СКЗ (RMS)'); grid on;
ylabel('Значение');

%% 5.3 МЕТОД ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ (PCA)
% График рассеяния: СКЗ против Пик-фактора
figure('Name', 'Анализ распределения признаков');
gscatter(dataset.CrestFactor, dataset.RMS, dataset.Fault_Type);
title('Диаграмма рассеяния: RMS vs Crest Factor');
xlabel('Пик-фактор'); ylabel('СКЗ (RMS)'); grid on;

% Анализ главных компонент (PCA)
features = [dataset.RMS, dataset.Kurtosis, dataset.CrestFactor];
[coeff, score, latent, tsquared, explained] = pca(features);

figure('Name', 'Анализ PCA');
gscatter(score(:,1), score(:,2), dataset.Fault_Type);
title(['PCA: Объясненная дисперсия ', num2str(sum(explained(1:2)), '%.2f'), '%']);
xlabel('ГК1 (PC1)'); ylabel('ГК2 (PC2)'); grid on;

%% 5.4 Т-ТЕСТ (КРИТЕРИЙ СТЬЮДЕНТА)
% Статистическое сравнение классов 'Normal' и 'Inner_Race' по Эксцессу
data_normal = dataset.Kurtosis(dataset.Fault_Type == 'Normal');
data_fault = dataset.Kurtosis(dataset.Fault_Type == 'Inner_Race');
[h, p, ci, stats] = ttest2(data_normal, data_fault);

fprintf('\n-- Результаты Т-теста (Normal vs Inner Race по Эксцессу) --\n');
fprintf('Значение p-value: %.4e\n', p);
if h == 1
    fprintf('Результат: Различия статистически значимы (H=1)\n');
else
    fprintf('Результат: Значимых различий не обнаружено (H=0)\n');
end

```

Список литературы:

1. Mobley R. K. An Introduction to Predictive Maintenance. – Burlington : Elsevier, 2002. – 508 p.
2. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2006. – Vol. 20. – P. 1483–1510.
3. Randall R. B. Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications. – Chichester: John Wiley & Sons, 2011. – 404 p.
4. McFadden P. D., Smith J. D. Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique // Journal of Sound and Vibration. – 1984. – Vol. 96. – P. 69–82.

5. Tandon N., Choudhury A. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings // Tribology International. – 1999. – Vol. 32. – P. 469–480.
6. Antoni J. Cyclostationarity by examples // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2009. – Vol. 23. – P. 987–1036.
7. Widodo A., Yang B. S. Machine health prognostics using survival probability and support vector machine // Expert Systems with Applications. – 2011. – Vol. 38. – P. 8430–8437.
8. Lei Y., Lin J., He Z., Zuo M. A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2013. – Vol. 35. – P. 108–126.
9. Case Western Reserve University Bearing Data Center [Электронный ресурс]. – URL: <https://engineering.case.edu/bearingdatacenter> (дата обращения: 26.03.2026).
10. IMS Bearing Dataset, NASA [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nasa.gov/> (дата обращения: 26.03.2026).
11. Paderborn University Bearing Dataset [Электронный ресурс]. – URL: <https://mb.uni-paderborn.de> (дата обращения: 26.03.2026).
12. Zhang W., Peng G., Li C. A new deep learning model for fault diagnosis with good anti-noise and domain adaptation ability // Measurement. – 2017. – Vol. 94. – P. 433–439.
13. Lee J., Bagheri B., Kao H. A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems // Manufacturing Letters. – 2015. – Vol. 3. – P. 18–23.

Примечание. При написании статьи были применены технологии искусственного интеллекта.

© Силла Амаду, 2026

ПЕРСПЕКТИВЫ И БАРЬЕРЫ ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ПОДСТАНЦИЯХ

студент **Шарафутдинова Диляра Шакуровна**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент **Федотов Евгений Александрович**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В статье анализируются перспективы внедрения интеллектуальных систем на электрических подстанциях в рамках их цифровой трансформации. Рассматриваются преимущества перехода к «цифровым подстанциям» с функциями предиктивной диагностики и адаптивного управления. Выявлены ключевые барьеры внедрения: износ оборудования, риски кибербезопасности, отсутствие единых стандартов совместимости и дефицит квалифицированных кадров. Определены ключевые направления развития систем автоматизации, которые значительно повысят надежность и эффективность работы подстанций в составе современных энергосистем.

Ключевые слова: электрическая подстанция, интеллектуальные системы, цифровая трансформация, автоматизация, предиктивная диагностика, надежность энергоснабжения.

PROSPECTS AND BARRIERS TO THE INTRODUCTION OF INTELLIGENT SYSTEMS IN SUBSTATIONS

Student **Sharafutdinova Dilara Shakurovna**,
Academic Advisor: PhD in Engineering, Associate Professor
Fedotov Evgeny Alexandrovich,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The article analyzes the prospects for the introduction of intelligent systems at electrical substations as part of their digital transformation. The advantages of the transition to «digital substations» with predictive diagnostics and adaptive control functions are considered. Key barriers to implementation have been identified: equipment wear, cybersecurity risks, lack of uniform compatibility standards, and a shortage of qualified personnel. The key directions of automation systems development have been identified, which will significantly increase the reliability and efficiency of substations in modern power systems.

Keywords: electrical substation, intelligent systems, digital transformation, automation, predictive diagnostics, reliability of energy supply.

Традиционные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) на электрических подстанциях, формировавшиеся на протяжении десятилетий, представляют собой комплексы

устройств и программного обеспечения, предназначенные для мониторинга, управления и защиты электрооборудования. Их архитектура, как правило, основана на централизованном управлении и иерархической структуре. Основу таких систем составляют программируемые логические контроллеры (ПЛК), специализированные контроллеры присоединений (РЗА – релейная защита и автоматика), а также SCADA-системы (Supervisory Control And Data Acquisition) верхнего уровня для сбора данных и диспетчерского управления. Ключевые характеристики традиционных АСУ ТП включают специфичные протоколы связи, индивидуализацию решений (уникальные настройки для каждого присоединения), ограниченный объем собираемых данных (преимущественно текущие параметры и дискретные сигналы) и акцент на реагирование, а не на предсказание [1]. Основные ограничения традиционных АСУ ТП заключаются в низкой гибкости и адаптивности, ограниченной наблюдаемости, высоких затратах на обслуживание и модернизацию, низкой пропускной способности для данных, зависимости от физического присутствия персонала и неспособности к прогнозированию.

«Цифровая подстанция» (Digital Substation) – это новый этап эволюции подстанций, основанный на полной интеграции цифровых технологий, позволяющий перейти от разрозненных автоматизированных функций к единой, интеллектуальной системе управления. Это не просто модернизация отдельных компонентов, а фундаментальное изменение архитектуры и подхода к эксплуатации [2]. Переход к концепции «цифровой подстанции» знаменует собой принципиально новый этап в эволюции энергетических объектов, где на смену разрозненным автоматизированным функциям приходит единая интеллектуальная экосистема управления. Ключевые отличия цифровой подстанции от традиционной заключаются, прежде всего, в тотальной цифровизации первичного оборудования, оснащенного интеллектуальными датчиками и коммуникационными интерфейсами. Важным технологическим сдвигом является внедрение распределенной архитектуры и волоконно-оптических каналов связи, приходящих на смену громоздким медным кабельным системам, что многократно увеличивает пропускную способность информационных потоков.

Эти изменения открывают доступ к предиктивной аналитике, самодиагностике и адаптивному управлению в режиме реального времени. Объединение данных в единой платформе оптимизирует оперативное управление и повышает уровень кибербезопасности. В результате цифровая подстанция переходит из категории пассивных объектов в статус интеллектуальных систем, способных эффективно обеспечивать надежность энергоснабжения в условиях цифровой экономики [3].

Цифровизация электроэнергетики и интеллектуального создания подстанций основана на стандарте IEC 61850, представляющем идеологию объектно-ориентированного анализа. В отличие от традиционных методов, он использует именованные объекты вместо физических адресов для описания логических узлов подстанции. Стандарт включает протоколы GOOSE для быстрой автоматики, выборочные значения (SV) для передачи цифровых измерений и MMS для связи со SCADA. Применение МЭК 61850 обеспечивает

совместимость оборудования, подключение кабельных соединений и напряжение наладки по стандартному счету языковой конфигурации SCL.

Внедрение технологий промышленного интернета вещей (IIoT) в архитектуру современных станций и подстанций знаменует переход от традиционного мониторинга к концепции прозрачных и самодиагностируемых энергосистем. Интеллектуальные датчики на первом этапе отслеживают не только электрические параметры, но и состояние оборудования: вибрацию турбины, температурные контакты, химический состав масла и влажность. Использование беспроводных сетей (LoRaWAN, NB-IoT и др.) позволяет разворачивать системы контроля на действующих объектах без прокладки кабельных трасс, обеспечивая мониторинг ранее достигнутых показателей экономической эффективности.

ИИ и машинное обучение (ML) трансформируют традиционные энергообъекты в адаптивные системы, переводя управление от реактивного к проактивному. Основное применение технологии – предиктивная аналитика: алгоритмы ML обрабатывают данные IoT-сенсоров (вибрация, температура, состав масла), выявляя аномалии и тренды, скрытые от традиционных систем. Это позволяет прогнозировать отказы оборудования, переходить к обслуживанию по фактическому состоянию (Condition-Based Maintenance) и минимизировать внеплановые простои и ремонтные расходы [4].

Нейронные сети и глубокое обучение повышают точность прогнозирования потребления, наблюдают за влиянием погоды на ВИЭ и балансируют генерацию на первом этапе, улучшают стабильность сети и снижают потери. В релейной защите ИИ создает адаптивные системы, оптимизирующие локализацию повреждений и восстановление электроснабжения (самовосстанавливающаяся сеть). ML-алгоритмы анализируют происшествия для предотвращения инцидентов. ИИ также используется для управления спросом, оптимизируя нагрузку. Интеграция ИИ и ML делает энергосистему надежной, гибкой и устойчивой к вызовам XXI века.

Концепция больших данных (Big Data) и аналитических платформ – основа цифровой стратегии управления энергообъектами. Современные объекты генерируют огромные объемы разнородной информации, а международные методы обработки не справляются. Платформы нового поколения, использующие облачные структуры, консолидируют эти данные, превращая их в ценный ресурс для принятия решений.

Центральная задача платформы – глубокий анализ состояния энергосистемы для соблюдения закономерностей между режимами работы оборудования и постоянными факторами. Инструменты больших данных в управлении активами (управление эффективностью активов) позволяют комплексно оценивать состояние оборудования, оптимизируя планирование и снижая затраты. Интеграция больших данных с машинным обучением помогает создавать точные профили нагрузки и моделировать распределенную генерацию в Smart Grid.

Технология цифровых двойников (Digital Twins) – ключевой инструмент цифровой трансформации энергетики, создающий движущие виртуальные физические объекты (трансформаторы, генераторы, подстанции). В отличие от

статических моделей, двойник постоянно синхронизируется с прототипом через IoT-датчики и телеметрию. Это позволяет не только визуализировать текущее состояние оборудования, но и анализировать скрытые внутренние процессы, такие как тепловые потоки или движущая нагрузка [5].

Ключевое преимущество цифровых двойников – имитационное моделирование показывает «что, если» без риска для реального оборудования и энергосистемы. Инженеры могут протестировать последствия переключений и оценить их виртуально, выбирая безопасные решения. Двойники также обеспечивают прогнозное управление, точно определяя износ и деградацию на основе истории и прогнозов. Это позволяет оптимизировать инвестиции и ремонты, исходя из фактического остаточного ресурса, переход к стратегии управления жизненным циклом.

Внедрение интеллектуальных систем на электрических станциях и подстанциях сталкивается с существенными барьерами, замедляющими цифровую трансформацию. Один из ключевых вызовов это кибербезопасность: переход на цифровые протоколы связи и объединение технологических сетей с корпоративными и глобальными каналами открывает новые векторы для хакерских атак. Уязвимость интеллектуальных устройств и возможность удалённого перехвата управления повышают риск масштабных аварий, из-за чего организации осторожны в внедрении инноваций. Второй значимый барьер проблема совместимости (интероперабельности) и отсутствие единых стандартов. Несмотря на развитие стандарта МЭК 61850, сложно интегрировать оборудование разных производителей и поколений, что приводит к «информационным островам» и удорожает пусконаладочные работы.

Не менее важным является кадровый барьер, выражающийся в остром дефиците специалистов, обладающих компетенциями одновременно в области классической электроэнергетики и современных информационных технологий. Работа с цифровыми двойниками, большими данными и сложными сетевыми протоколами требует от персонала качественно иного уровня подготовки, а необходимость переобучения существующих сотрудников сталкивается с психологическим сопротивлением изменениям. Наконец, техническое состояние уже эксплуатируемого парка оборудования часто становится препятствием: значительная часть первичных аппаратов была спроектирована в доцифровую эпоху и не оснащена необходимыми интерфейсами для интеграции в интеллектуальные системы, что требует их досрочной замены или использования дорогостоящих адаптеров. Все эти факторы в совокупности формируют сложную среду, в которой развитие интеллектуальной автоматизации требует не только технологических прорывов, но и глубоких изменений в системе управления, образовании и государственном регулировании энергетической отрасли.

Перспективы преодоления существующих барьеров и дальнейшие пути развития интеллектуальных систем автоматизации в энергетике лежат в плоскости системной трансформации подходов к проектированию, управлению и нормативному регулированию отрасли. Одной из ключевых стратегий решения проблемы кибербезопасности становится переход к концепции встроенной безопасности (Security by Design), где механизмы криптографической защиты,

аутентификации и контроля целостности данных внедряются непосредственно на уровне аппаратной архитектуры интеллектуальных электронных устройств. Развитие отечественного программного обеспечения и аппаратных платформ в рамках обеспечения технологического суверенитета позволяет минимизировать риски использования недокументированных возможностей и зависимости от зарубежных вендоров. Проблема интероперабельности и несовместимости протоколов решается через дальнейшее совершенствование и расширение применения международных и национальных стандартов, таких как МЭК 61850 и CIM (общая информационная модель), что обеспечивает бесшовную интеграцию оборудования различных производителей и создание единого информационного ландшафта от первичного датчика до систем управления предприятием.

Будущие пути развития интеллектуальных систем направлены на создание полностью автономных «самозалечивающихся» сетей (Self-healing Grids), способных самостоятельно ликвидировать аварии и оптимизировать свою топологию без вмешательства человека. Глубокая интеграция распределенной генерации, систем накопления энергии и технологий активного управления спросом превращает традиционную иерархическую энергосистему в гибкую экосистему, где каждый узел обладает элементами интеллекта. Внедрение квантовых вычислений для оптимизации сверхсложных сетевых задач и использование распределенных реестров (блокчейн) для обеспечения прозрачности и безопасности транзакций в микросетях станут следующими этапами технологического прогресса. Таким образом, комплексное преодоление барьеров через синергию технологий, государственного регулирования и образования открывает путь к созданию энергетической инфраструктуры нового поколения, характеризующейся абсолютной надежностью, высокой энергоэффективностью и способностью к мгновенной адаптации к любым внешним вызовам.

Список литературы:

1. Горбунов, А. А. Автоматизированное проектирование электрической части станций и подстанций / А. А. Горбунов // Вестник науки. – 2025. – Т. 3, № 1(82). – С. 1045-1052.
2. Артюхов, И. И. Электрооборудование электрических станций и подстанций: учеб. пособие для студентов направления 551700, специальностей 100400, 100500, 100700 / И. И. Артюхов, В. Д. Куликов, В. В. Тютманова; И. И. Артюхов, В. Д. Куликов, В. В. Тютманова; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. агентство по образованию, Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2005.
3. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: учебник для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по специальностям 140206 «Электрические станции, сети и системы», 140203 «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» / Л. Д. Рожкова, Л. К. Карнеева, Т. В. Чиркова; Л. Д. Рожкова, Л. К. Карнеева, Т. В. Чиркова. – 4-е изд., стер. – Москва: Академия, 2007. – (Среднее профессиональное образование.

Энергетика).

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019610510 Российская Федерация. Автоматизированная система управления электрической станции и подстанции «ЗАРЯ»: № 2018665068: заявл. 25.12.201: опубл. 11.01.2019 / А. П. Алефиров, А. В. Ракитянский, Kgv; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «СТРОЙ-СОЮЗ».

5. Бабкин, П. А. Современные методы диагностики электрооборудования электрических станций и подстанций / П. А. Бабкин, Д. Е. Емельянов, М. Ю. Еремин // Современные научно-практические решения в АПК: материалы Международной студенческой научно-практической конференции, Воронеж, 23 октября 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2023. – С. 31-36.

Примечание. При написании статьи были применены технологии искусственного интеллекта.

© Шарафутдинова Д. Ш., 2026

САМООБУЧЕНИЕ ДЛЯ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ АВТОНОМНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

аспирант **Верхоланцев Дмитрий Витальевич**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент

Мишин Алексей Владимирович,

Автономная некоммерческая организация высшего образования
«Московский университет «Синергия»,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматриваются основные подходы к реализации стратегического самообучения в сервисных робототехнических системах. На основании проведённого анализа предлагается компромиссная иерархическая система управления, объединяющая достоинства разных методов и основанная на идеи применения фундаментальной модели в качестве планировщика. Ключевой идеей предложенного подхода является применение результатов логирования в качестве контекста модели для генерации стратегии.

Ключевые слова: автономный робот, агент, система управления, нейросеть, обучение с подкреплением, нейросимволический искусственный интеллект, фундаментальные модели.

SELF-LEARNING FOR STRATEGIC PLANNING IN AUTONOMOUS ROBOTICS PROBLEMS

Postgraduate Student **Verkholantsev Dmitry Vitalievich**,

Academic Advisor: PhD in Engineering Sciences, Associate Professor

Mishin Alexey Vladimirovich,

Autonomous Non-Commercial Organization of Higher Education
«Synergy Moscow University»
Moscow, Russian Federation

Abstract. This paper examines the main approaches to implementing strategic self-learning in service robotic systems. Based on the conducted analysis, a compromise hierarchical control system is proposed that combines the advantages of different methods and is based on the idea of using a foundation model as a planner. The key idea of the proposed approach is to use logging results as the model context for strategy generation.

Keywords: autonomous robot, agent, control system, neural network, reinforcement learning, neurosymbolic artificial intelligence, foundation models.

Множество компаний по всему миру ведут активные исследования и разработки в области создания сервисных роботов для решения разнообразных задач, среди которых сопровождение и помощь людям, доставка грузов, патрулирование территории, выполнение работ на складах и заводах и т. д. Ключевой особенностью таких роботов становится необходимость

функционирования в динамической недетерминированной среде для выполнения комплексных задач. На первый план здесь выходит потребность в развитии систем управления, способных адаптироваться к происходящим изменениям, выявлять закономерности окружающего мира и выполнять сложные составные задачи.

Главным свойством автономной робототехнической системы (РТС) является способность самостоятельно выполнять поставленную задачу без прямого управления оператором. Важным условием автономности робота является наличие соответствующей автономной системы управления. Основной задачей системы управления является обработка внешних данных и формирование с их учётом управляющих воздействий для достижения необходимого результата. В структуре системы управления можно выделить три основных уровня [1]:

- стратегический (решение глобальной задачи путём разбиения её на выполнимые подзадачи);
- тактический (решение подзадачи путём формирования управляющих воздействий);
- исполнительный (расчёт управляющих сигналов для двигателей с учётом динамики и кинематики РТС).

Такой подход называется иерархическим. Здесь следует заметить, что разделение на уровни является условным и служит для наиболее наглядного отображения и анализа принципов функционирования системы. Помимо трёх ранее упомянутых уровней в системе управления принято выделять подсистему обратной связи, корректирующую неопределённости реального оборудования, и подсистему обработки данных о состоянии внешней среды, извлекающую информацию, необходимую для достижения поставленной задачи с учётом неопределённостей реального мира. Итоговая структурная схема системы управления автономным роботом представлена на рисунке 1.

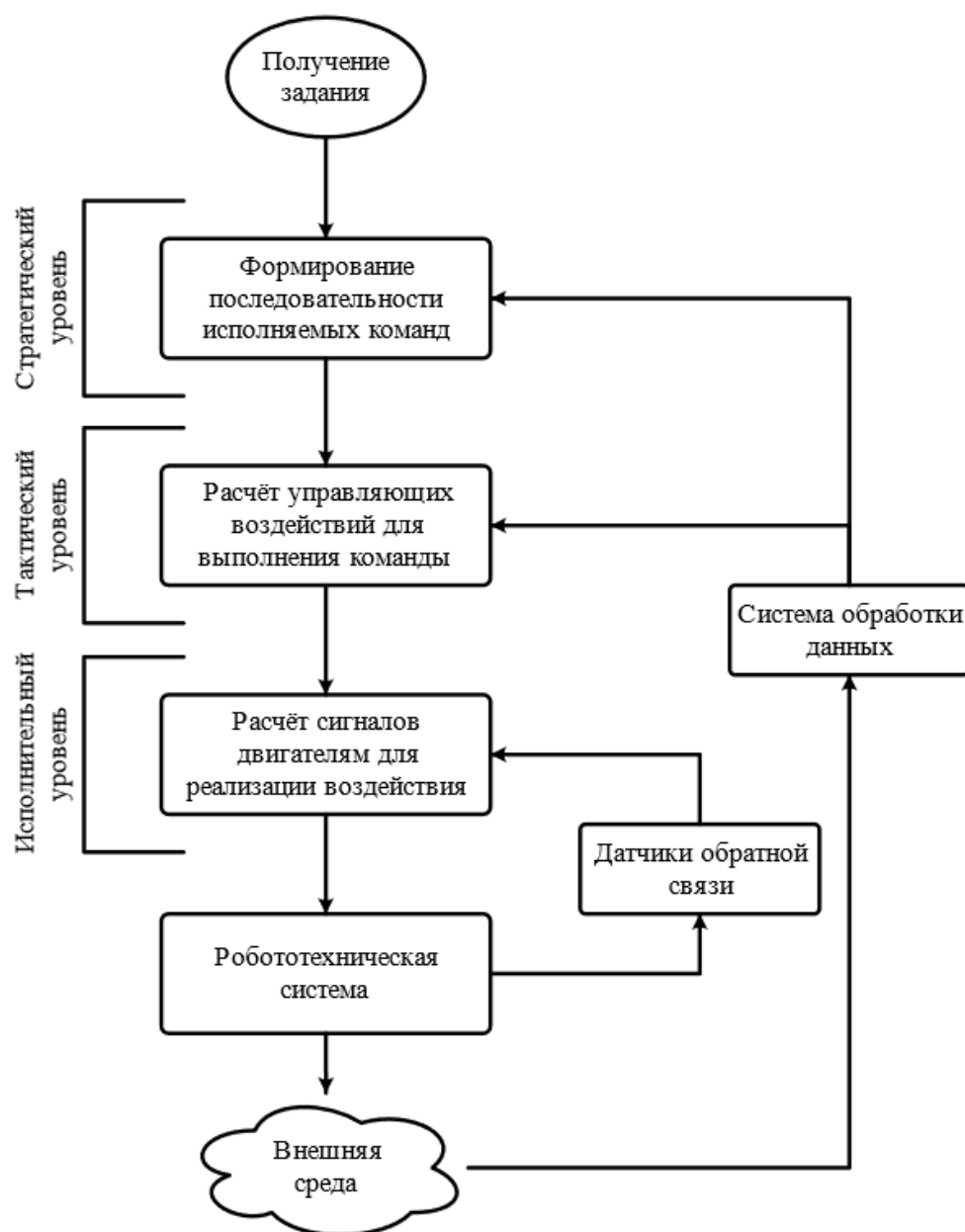


Рисунок 1. Структурная схема системы управления автономным роботом

В классическом представлении система управления функционирует, оперируя набором строго заданных правил, составляющих базу знаний (БЗ) РТС. Однако для недетерминированной среды данный подход несостоятелен, так как не способен к адаптации к меняющимся условиям. Отсюда возникает необходимость в способности системы к самообучению – автономному формированию базы знаний. Не менее важной является возможность системы самостоятельно принимать решения на основании имеющейся БЗ. Такие системы принято называть агентами [2].

Наиболее перспективным подходом к реализации самообучающихся систем на сегодняшний день выступает метод, основанный на применении алгоритмов машинного обучения. Эта технология позволяет выявлять скрытые закономерности в огромных массивах данных. По мере обработки новой информации такие системы способны корректировать свои внутренние параметры, адаптируясь к изменяющимся условиям и исправляя собственные ошибки. В

результате повышается точность принимаемых решений без прямого вмешательства разработчика. Парадигму совмещения робототехники, компьютерного зрения и машинного обучения принято называть воплощённым искусственным интеллектом [3].

Можно выделить три основных современных подхода к реализации самообучающихся систем управления:

- иерархическое обучение с подкреплением [4];
- модели Vision-Language-Action [5];
- нейросимволический искусственный интеллект [6].

Иерархическое обучение с подкреплением (Hierarchical Reinforcement Learning, HRL) – это подход, при котором сложная задача разбивается на несколько уровней абстракции (иерархию). Вместо того, чтобы один алгоритм (агент) пытался выучить всё от простейших движений до глобального плана, создается структура:

- высокоуровневый агент (мета-контроллер) выбирает глобальные подцели;
- низкоуровневые агенты (исполнители/контроллеры) решают, как именно управлять моторами, чтобы эту подцель выполнить.

Схема процесса функционирования системы представлена на рисунке 2.

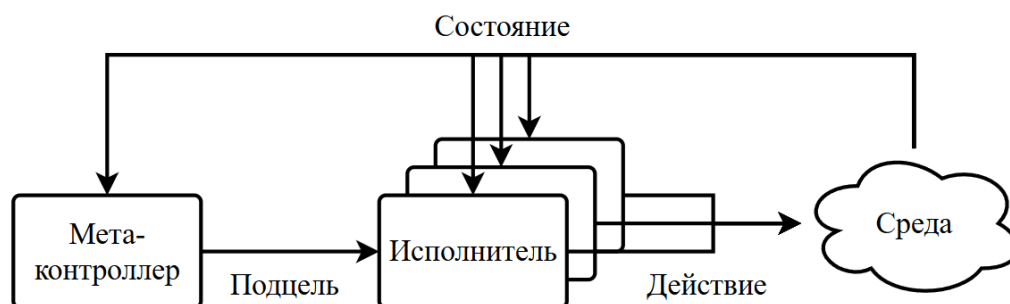


Рисунок 2. Схема процесса функционирования системы на основе HRL

Иерархичность системы даёт возможность переиспользовать уже полученные низкоуровневые навыки, что упрощает процесс дообучения. Однако, здесь стоит заметить, что использование данного подхода сопряжено с рядом проблем. Первая – проблема обучения. Параллельное изменение высокоуровневой и низкоуровневых политик замедляет процесс обучения, так как поведение одной из них может не соответствовать ожиданиям другой. Симуляционный характер обучения также усложняет понимание агентом семантики реального мира. Вторая проблема – сложность применения. Результирующая стратегия зачастую является субоптимальной, а логика принятия решения неинтерпретируемой.

Применение моделей Vision-Language-Action (VLA, Зрение-Язык-Действие) в значительной степени решает проблемы обучения, описанные ранее. Этот подход объединяет техническое зрение, обработку естественного языка и стратегическое мышление, присущее фундаментальным моделям [7]. Входом модели является изображение с камеры и текстовый запрос, а выходом – одно из доступных действий. Принято выделять два основных компонента таких моделей:

- визуально-языковой энкодер (предобученная фундаментальная модель, расширенная на визуальную модальность, VLM);

- декодер действий (подсистема, формирующая исполняемые на роботе команды).

Существует две основные архитектуры взаимодействия этих компонентов. В первом случае энкодер и декодер представляют собой единую систему [5, 8], что снижает задержки при передаче информации, но замедляет общую скорость функционирования за счёт высокой вычислительной сложности фундаментальных моделей. Более современный подход предполагает разделение энкодера и декодера на две отдельные системы [9], взаимодействующие через общее скрытое векторное пространство. В таком случае медленная фундаментальная модель не ограничивает скорость декодера действий, что увеличивает манёвренность системы. Схематичное сравнение описанных архитектур представлено на рисунке 3.

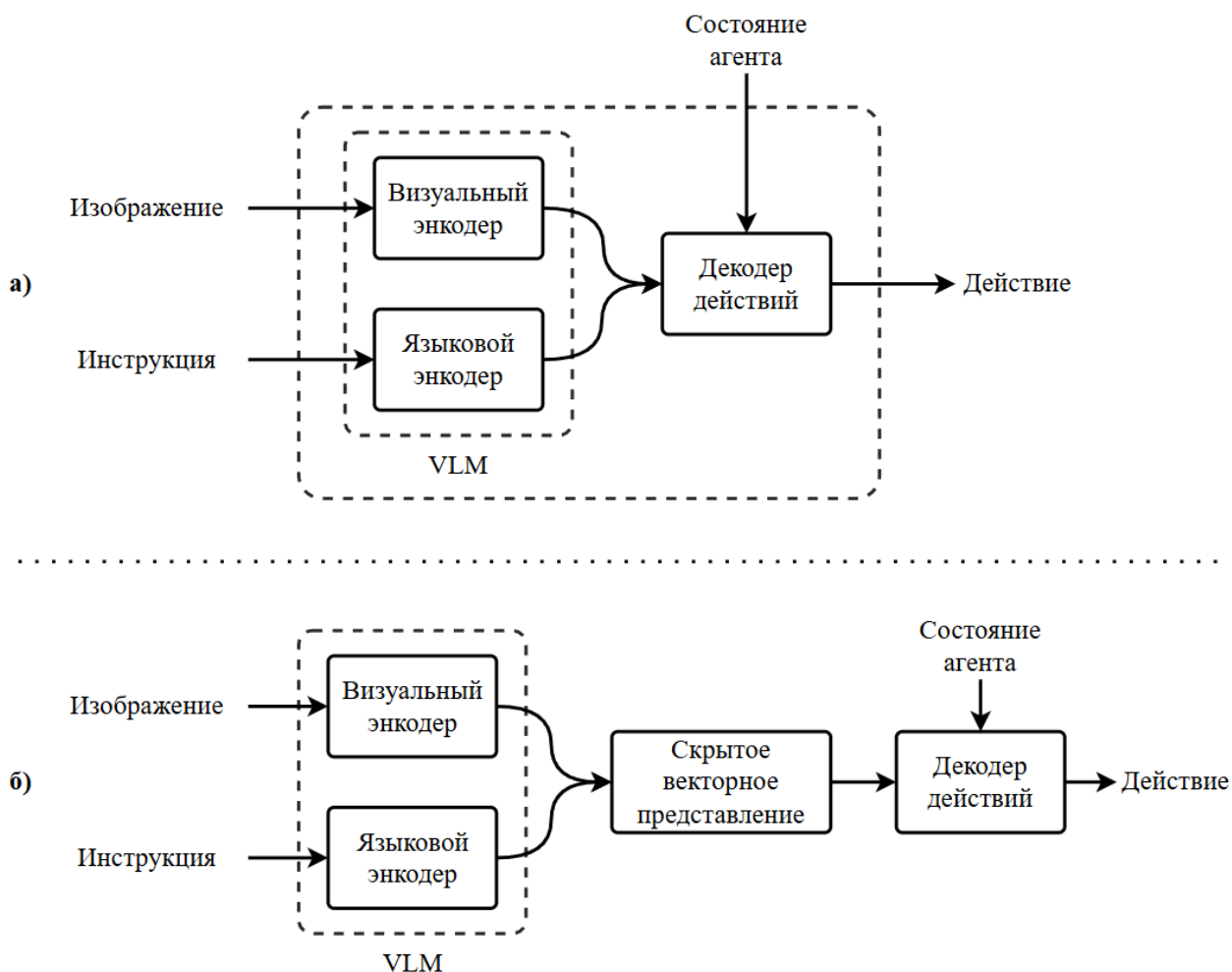


Рисунок 3. Структурная схема:
а) односистемной и б) двухсистемной архитектуры VLA

Обучение здесь происходит комплексно от начала до конца на больших объёмах специфических данных. Отсюда возникает первая проблема VLA — визуальных и текстовых данных человечество накопило очень много, но для обучения декодера необходимо сопоставление этих данных с действиями. Это в значительной степени удорожает и замедляет разработку. Ещё одна проблема такого подхода связана с базовым принципом работы нейросетевых алгоритмов. Они

оперируют векторными неинтерпретируемыми представлениями, что не даёт возможности ручной корректировки принятия решений и приводит к необходимости переобучения модели под каждое воплощение РТС из-за изменения пространства доступных действий.

Для решения проблемы «чёрного ящика» была предложена концепция нейросимволического искусственного интеллекта [10]. Предлагаемый подход базируется на когнитивной концепции дуального процесса мышления [11], интегрируя механизмы высокоскоростной обработки данных и аналитического принятия решений. Архитектурно система реализуется посредством объединения двух модулей: нейросетевого и символического.

Нейросетевая подсистема выполняет функцию «быстрого» восприятия, обеспечивая оперативную обработку неструктурированной сенсорной информации. На данном этапе глубокие нейронные сети осуществляют экстракцию значимых признаков из видеопотока, трансформируя непрерывные данные в дискретное пространство признаков (словарь атрибутов).

Символическая подсистема, в свою очередь, эмулирует «медленное», последовательное мышление. Она оперирует методами математической логики и продукционными правилами, которые могут быть заданы априорно или синтезированы в процессе обучения. Сформированная в результате логического вывода команда транслируется на контроллеры нижнего уровня для физического исполнения.

Обучение агента базируется на парадигме индуктивного логического программирования. На основе эмпирических наблюдений система автономно генерирует новые логические конструкции, инкрементально расширяя собственную базу знаний. Существенным преимуществом данной гибридной архитектуры является высокая интерпретируемость процесса принятия решений, что обеспечивает возможность экспертной верификации и корректировки логики поведения системы.

Тем не менее, нейросимволические модели обладают рядом фундаментальных ограничений:

- трансформация непрерывных данных реального мира в дискретные логические репрезентации часто сопровождается потерей семантической информации и ошибками классификации.

- дискретная природа символьных вычислений препятствует применению классического алгоритма обратного распространения ошибки для сквозного обучения системы.

- увеличение числа правил провоцирует комбинаторный взрыв при построении дерева логического вывода, что приводит к экспоненциальному росту вычислительной сложности и неспособности системы функционировать в режиме реального времени.

Каждый из описанных методов обладает своими достоинствами и недостатками, отсюда можно сделать предположение, что наиболее эффективным решением задачи стратегического самообучения будет компромиссное решение, объединяющее достоинства разных подходов.

Иерархическая архитектура системы управления позволяет добиться большей гибкости на этапе имплементации за счёт своей модульности.

Распределение задач также позволяет упростить процесс обучения благодаря возможности переиспользования и точечного улучшения отдельных компонентов. Различная частота обработки данных и вычислительная сложность алгоритмов позволяет перераспределять ресурсы более целесообразно. Отсюда можно сделать вывод о необходимости структуры, состоящей из низкочастотного планировщика, формирующего последовательность целенаправленных задач, и набора высокочастотных исполнителей, каждый из которых реализует конкретную задачу.

Фундаментальные языковые модели продемонстрировали способности к эффективному естественному взаимодействию с пользователем, пониманию семантики реального мира и стратегическому мышлению. Расширение за счёт добавления визуальной модальности позволяет своевременно получать информацию о состоянии окружающей среды и сопоставлять реальные объекты с лингвистическими концептами. Активное развитие и использование таких моделей в разных областях позволяет использовать их в качестве планировщика без необходимости с нуля обучать узкоспециализированную модель.

Процесс обучения в процессе функционирования с учётом специфики задачи и среды возможно решить с помощью системы генерации с дополненной выборкой (Retrieval-Augmented Generation, RAG) [12]. Этот подход позволяет модели формировать ответ на запрос пользователя с учётом предоставленного контекста. Таким контекстом для робототехнической системы может быть результат логирования (журналирования) событий с учётом состояния среды, принятых решений и результатов их исполнения. Отдельно появляется возможность ручного формирования базовых правил поведения. Принцип оценки эффективности работы системы, как и строгое следование предоставленным правилам требуют дополнительных исследований.

В низкоуровневых задачах свою эффективность доказали методы, основанные на классическом обучении с подкреплением (Reinforcement Learning, RL) [13] или имитационном обучении (Imitation Learning, IL) [14]. В данном случае симуляционный характер обучения позволяет избежать дорогостоящих работ с использованием реального оборудования. Сверх того, разработка упрощается за счёт наличия развитого алгоритмического и программного аппарата для решения задач обучения и имплементации. Однако, стоит заметить, что совмещение фундаментальных моделей и нейросетевых политик требует дополнительных исследований. Итоговая структурная схема системы управления условным сервисным роботом представлена на рисунке 4.

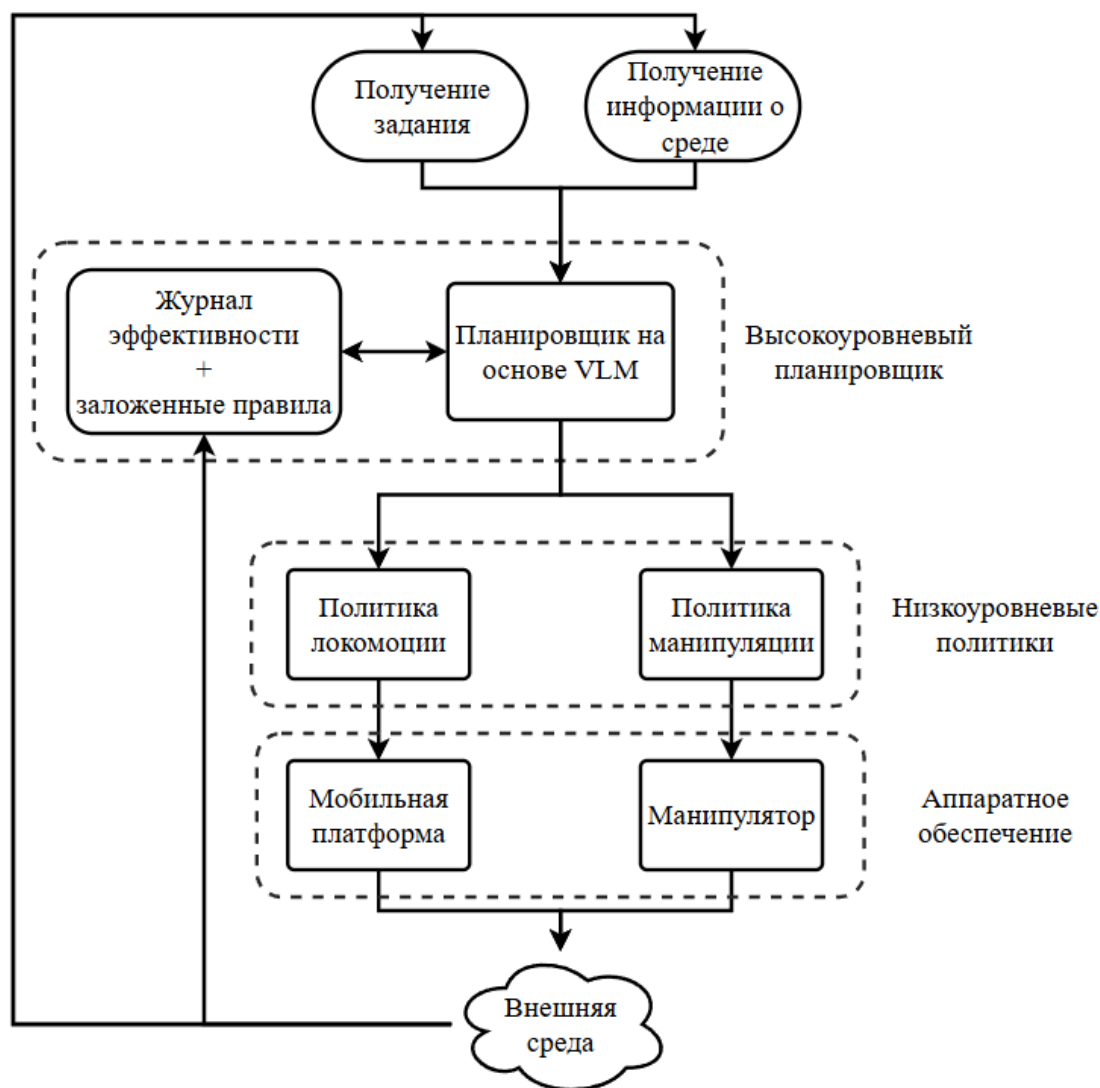


Рисунок 4. Структурная схема предлагаемой системы управления условным сервисным роботом

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что функционирование автономных мобильных роботов в динамичных и недетерминированных средах требует перехода от классических систем управления со строго заданными правилами к адаптивным самообучающимся агентам.

Анализ современных парадигм воплощенного искусственного интеллекта – иерархического обучения с подкреплением (HRL), моделей Vision-Language-Action (VLA) и нейросимволического ИИ – показал, что каждый из подходов обладает как существенными достоинствами, так и критическими ограничениями (вычислительная сложность, проблемы «черного ящика», или потребность в огромных специфических наборах данных).

В качестве наиболее эффективного пути решения проблемы предложена компромиссная иерархическая структурная схема системы управления, объединяющая сильные стороны рассмотренных подходов. Ее ключевой особенностью является использование результатов логирования в качестве контекста фундаментальной модели.

Предложенная модульная архитектура позволяет оптимизировать распределение вычислительных ресурсов, упрощает процесс дообучения системы и повышает ее общую гибкость.

В качестве направлений для дальнейших исследований выделяются задачи интеграции фундаментальных моделей с нейросетевыми политиками нижнего уровня, разработка метрик оценки эффективности функционирования подобных гибридных систем, а также механизмов, гарантирующих строгое следование роботом заданным правилам безопасности.

Список литературы:

1. Пшихопов, В. Х. и др. Разработка интеллектуальной системы управления автономного подводного аппарата / В. Х. Пшихопов и др. // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – №. 3 (152). – С. 87-101.
2. Панов, А. И. Одновременное планирование и обучение в иерархической системе управления когнитивным агентом / А. И. Панов // Автоматика и телемеханика. – 2022. – №. 6. – С. 53-71.
3. Duan J. et al. A survey of embodied ai: From simulators to research tasks //IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence. – 2022. – Т. 6. – №. 2. – P. 230-244.
4. Hutsebaut-Buysse M., Mets K., Latré S. Hierarchical reinforcement learning: A survey and open research challenges //Machine Learning and Knowledge Extraction. – 2022. – Т. 4. – №. 1. – P. 172-221.
5. Zitkovich B. et al. Rt-2: Vision-language-action models transfer web knowledge to robotic control //Conference on Robot Learning. – PMLR, 2023. – P. 2165-2183.
6. Garnelo M., Shanahan M. Reconciling deep learning with symbolic artificial intelligence: representing objects and relations //Current Opinion in Behavioral Sciences. – 2019. – Т. 29. – P. 17-23.
7. Naveed H. et al. A comprehensive overview of large language models //ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology. – 2025. – Т. 16. – №. 5. – P. 1-72.
8. Kim M. J. et al. Openvla: An open-source vision-language-action model //arXiv preprint arXiv: 2406.09246. – 2024.
9. Bjorck J. et al. Gr00t n1: An open foundation model for generalist humanoid robots //arXiv preprint arXiv: 2503.14734. – 2025.
10. Garnelo M., Shanahan M. Reconciling deep learning with symbolic artificial intelligence: representing objects and relations //Current Opinion in Behavioral Sciences. – 2019. – Т. 29. – P. 17-23.
11. Kahneman D. Thinking, fast and slow //Farrar, Straus and Giroux. – 2011.
12. Lewis P. et al. Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive nlp tasks //Advances in neural information processing systems. – 2020. – Т. 33. – С. 9459-9474.
13. Shakya A. K., Pillai G., Chakrabarty S. Reinforcement learning algorithms: A brief survey //Expert Systems with Applications. – 2023. – Т. 231. – P. 120495.
14. Hussein A. et al. Imitation learning: A survey of learning methods //ACM Computing Surveys (CSUR). – 2017. – Т. 50. – №. 2. – P. 1-35.

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ, ВОЗНИКАЮЩИХ ВСЛЕДСТВИЕ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ РОТОРА

студент **Казачкина Александра Анатольевна**,
студент **Китаева Рената Руслановна**,
науч. руководитель: ассистент **Черкасов Александр Сергеевич**,
ФГБОУ ВО «КГЭУ»,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В данной статье рассматривается одна из ключевых проблем эксплуатации турбомашин – неуравновешенность ротора и связанные с ней вибрационные процессы. В современных энергетических установках, таких как паровые и газовые турбины, устойчивость работы оборудования напрямую зависит от уровня вибрации. Такие явления особенно актуальны для турбин и других высокоскоростных машин.

Ключевые слова: неуравновешенность ротора, вибрация, динамическая сила, турбомашины, эксцентриситет, балансировка.

CALCULATION OF DYNAMIC FORCES RESULTING FROM ROTOR UNBALANCE

Student **Kazachkina Aleksandra Anatolyevna**,
Student **Kitayeva Renata Ruslanovna**,
Academic Advisor: Assistant Lecturer **Cherkasov Alexander Sergeevich**,
KSPEU,
Kazan, Russian Federation

Abstract. This article examines one of the key issues in turbomachinery operation: rotor unbalance and the associated vibration processes. In modern power plants, such as steam and gas turbines, the stability of equipment operation directly depends on the vibration level. Such phenomena are especially relevant for turbines and other high-speed machines.

Keywords: rotor unbalance, vibration, dynamic force, turbomachines, eccentricity, balancing.

В процессе эксплуатации турбомашин одной из наиболее распространённых проблем является возникновение вибраций, связанных с неуравновешенностью ротора. Данное явление представляет собой смещение центра масс относительно оси вращения, вследствие чего при работе машины возникают дополнительные динамические нагрузки. Эти нагрузки оказывают значительное влияние на надежность оборудования, срок службы его элементов и безопасность эксплуатации в целом. Особенно актуальна данная проблема для турбин, работающих при высоких частотах вращения, где даже незначительные отклонения могут приводить к существенным последствиям [1].

С физической точки зрения неуравновешенность ротора приводит к возникновению центробежной силы, направленной от оси вращения. Именно эта сила является основной причиной вибрации. Её величина определяется массой неуравновешенной части, величиной эксцентриситета и угловой скоростью вращения. При этом угловая скорость связана с частотой вращения ротора, что позволяет анализировать влияние режимов работы машины на величину возникающих нагрузок. Важно отметить, что зависимость динамической силы от скорости носит квадратичный характер, что делает высокооборотные машины особенно чувствительными к неуравновешенности [2].

Дополнительно следует отметить, что неуравновешенность ротора может иметь различную природу возникновения. Она может быть как конструктивной (заложенной на этапе проектирования), так и эксплуатационной, возникающей в процессе работы оборудования. К основным причинам относятся неравномерный износ деталей, эрозия и коррозия рабочих лопаток, накопление отложений, а также деформации, вызванные температурными и механическими воздействиями. Даже незначительное изменение геометрии ротора способно привести к смещению центра масс и, как следствие, к увеличению уровня вибрации.

С инженерной точки зрения различают несколько типов неуравновешенности: статическую, динамическую и комбинированную. Статическая неуравновешенность проявляется, когда центр масс смещён относительно оси вращения, но распределение массы остаётся симметричным вдоль длины ротора. Динамическая неуравновешенность возникает при неравномерном распределении массы в различных сечениях ротора, что приводит к появлению изгибающих моментов при вращении. На практике чаще всего встречается комбинированная форма, сочетающая признаки обоих типов.

Воздействие вибраций на элементы турбомашин носит комплексный характер. Повышенные динамические нагрузки вызывают ускоренный износ подшипников, ослабление крепёжных соединений, появление трещин в корпусных деталях и нарушение соосности валов. Кроме того, вибрации могут приводить к возникновению резонансных явлений, при которых амплитуда колебаний резко возрастает. Это особенно опасно, так как резонанс способен вызвать разрушение оборудования в короткие сроки [3].

Важным аспектом является влияние вибраций на рабочие характеристики машины. Повышенные колебания снижают КПД турбины, увеличивают потери энергии и могут приводить к нестабильности технологического процесса. В условиях промышленной эксплуатации это сопровождается увеличением затрат на обслуживание, снижением производительности и риском аварийных остановок.

Для предотвращения и снижения уровня вибраций применяются различные методы балансировки роторов. Балансировка может выполняться как в статическом, так и в динамическом режиме с использованием специализированного оборудования. Современные системы диагностики позволяют проводить мониторинг вибрационного состояния в реальном времени, выявляя отклонения на ранних стадиях. Это достигается за счёт применения вибродатчиков, систем спектрального анализа и методов математического моделирования [4].

Также широко используются методы прогнозирования технического состояния, основанные на анализе трендов изменения вибрационных параметров. Такие подходы позволяют перейти от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию, что значительно повышает эффективность эксплуатации оборудования.

Таким образом, проблема неуравновешенности ротора является одной из ключевых в области эксплуатации турбомашин. Её своевременное выявление и устранение позволяет существенно повысить надежность, продлить срок службы оборудования и обеспечить безопасную и экономически эффективную работу энергетических установок.

Динамическая сила определяется выражением:

$$F = m \cdot e \cdot \omega^2,$$

где m – масса, e – эксцентриситет, ω – угловая скорость.

Угловая скорость связана с частотой вращения следующим образом:

$$\omega = 2\pi n / 60.$$

В ходе выполнения работы рассматривался ротор с заданной массой, при этом изменялись частота вращения и эксцентриситет. Масса ротора 0,05 кг, частота вращения изменялась от 1000 до 5000 об/мин, эксцентриситет принимал значения 0,001; 0,002 и 0,003 м [5].

Была высчитана угловая скорость для каждой частоты вращения:

$$\omega_1 = 2\pi \cdot 1000 / 60 = 104,67 \text{ рад/с}$$

$$\omega_2 = 2\pi \cdot 2000 / 60 = 209,33 \text{ рад/с}$$

$$\omega_3 = 2\pi \cdot 3000 / 60 = 314 \text{ рад/с}$$

$$\omega_4 = 2\pi \cdot 4000 / 60 = 418,67 \text{ рад/с}$$

$$\omega_5 = 2\pi \cdot 5000 / 60 = 523,33 \text{ рад/с}$$

При одном выбранном эксцентриситете, равном 0,001 м, вычитываем динамическую силу с каждой угловой скоростью (рис. 1):

$$F_1 = 0,05 \cdot 0,001 \cdot 104,67^2 = 0,55 \text{ Н}$$

$$F_2 = 0,05 \cdot 0,001 \cdot 209,33^2 = 2,19 \text{ Н}$$

$$F_3 = 0,05 \cdot 0,001 \cdot 314^2 = 4,93 \text{ Н}$$

$$F_4 = 0,05 \cdot 0,001 \cdot 418,67^2 = 8,76 \text{ Н}$$

$$F_5 = 0,05 \cdot 0,001 \cdot 523,33^2 = 13,69 \text{ Н}$$

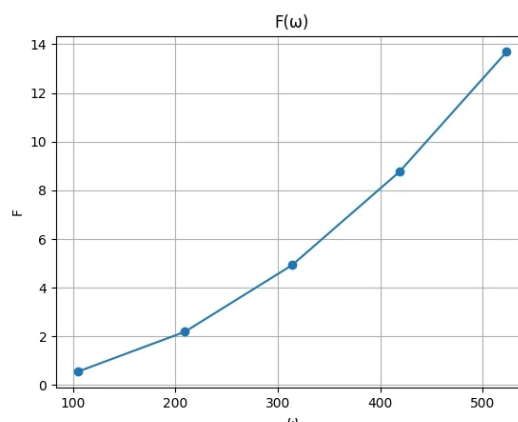


Рисунок 1. Зависимость динамической силы от угловой скорости

Проведённые расчёты показали, что при увеличении частоты вращения наблюдается рост динамической силы. Если при относительно низких оборотах значения силы остаются незначительными, то при переходе к высоким скоростям они возрастают в несколько раз. Это объясняется тем, что угловая скорость входит в формулу в квадрате, и даже небольшое её увеличение приводит к росту результата. Таким образом, именно скорость вращения является определяющим фактором, влияющим на уровень вибрации. Зависимость квадратичная.

Одновременно с этим было установлено, что эксцентриситет оказывает линейное влияние на величину динамической силы (рис. 2):

$$F_1 = 0,05 \cdot 0,001 \cdot 314^2 = 4,93 \text{ Н}$$

$$F_2 = 0,05 \cdot 0,002 \cdot 314^2 = 9,86 \text{ Н}$$

$$F_3 = 0,05 \cdot 0,003 \cdot 314^2 = 14,79 \text{ Н}$$

$$F_4 = 0,05 \cdot 0,004 \cdot 314^2 = 19,72 \text{ Н}$$

$$F_5 = 0,05 \cdot 0,005 \cdot 314^2 = 24,65 \text{ Н}$$

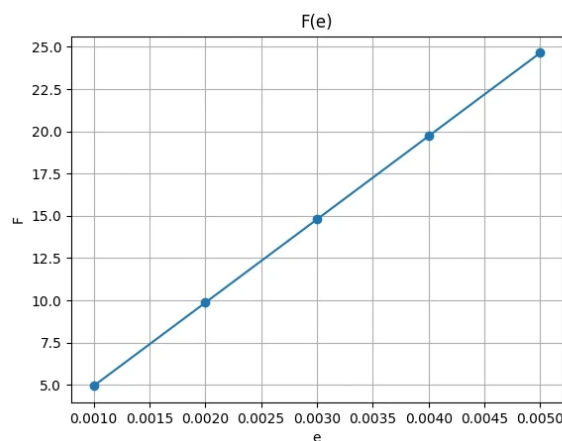


Рисунок 2. Зависимость динамической силы от эксцентриситета

Увеличение смещения центра масс приводит к пропорциональному росту нагрузки. Несмотря на кажущуюся незначительность изменений (порядка миллиметров), их влияние становится критическим при высоких скоростях вращения. Это особенно важно учитывать при изготовлении и сборке роторов, где требуется высокая точность.

Рассматривая полученные зависимости, можно отметить, что характер изменения динамической силы при варьировании параметров соответствует теоретическим представлениям. График зависимости силы от частоты вращения имеет вид возрастающей параболы, что подтверждает квадратичный закон. В то же время зависимость от эксцентриситета представляет собой прямую линию, что указывает на линейный характер влияния данного параметра. Такие результаты полностью согласуются с основными положениями теории вибрации и подтверждают корректность выполненных расчётов [6].

Следует учитывать, что в реальных условиях работа ротора осложняется рядом дополнительных факторов. В частности, большое значение имеют критические частоты вращения, при которых возникает резонанс. В этих режимах даже незначительная неуравновешенность может привести к резкому увеличению

амплитуды колебаний. Это связано с совпадением частоты возбуждающей силы с собственной частотой системы. В подобных условиях динамические нагрузки возрастают многократно, что может привести к повреждению оборудования. Несмотря на то, что в рамках данной работы резонансные явления не рассматривались, их влияние необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации турбин.

Особое внимание в практике эксплуатации турбомашин уделяется балансировке роторов. Данная процедура направлена на уменьшение неуравновешенности и снижение уровня вибрации до допустимых значений. В соответствии с действующими стандартами, в частности ГОСТ ISO 1940-1, существуют различные классы балансировки, определяющие допустимые уровни остаточной неуравновешенности. В зависимости от конструкции и назначения оборудования применяются как статические, так и динамические методы балансировки. Для высокоскоростных турбин наиболее эффективной является динамическая балансировка, позволяющая учитывать распределение массы по длине ротора.

Важную роль играет также вибродиагностика, позволяющая контролировать состояние оборудования в процессе эксплуатации. С помощью специальных датчиков измеряются параметры вибрации, на основании которых можно судить о наличии дефектов, степени износа и необходимости проведения ремонтных работ. Таким образом, диагностика и балансировка являются взаимодополняющими инструментами обеспечения надежной работы турбинных установок.

При выполнении расчётов в работе были приняты определённые допущения, упрощающие анализ. В частности, ротор рассматривался как абсолютно жёсткое тело, не учитывались демпфирующие свойства подшипников, а также влияние внешних нагрузок и резонансных явлений. В реальных условиях эти факторы могут существенно изменять характер вибрации, однако для целей данной работы их учет не является необходимым. Тем не менее, понимание их роли важно для более глубокого изучения процессов, происходящих в турбомашинах.

В ходе выполнения лабораторной работы можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на величину динамических сил оказывает частота вращения ротора. Именно этот параметр определяет интенсивность роста вибрационных нагрузок и требует особого контроля. Эксцентриситет и масса также оказывают значительное влияние, однако их воздействие носит линейный характер и менее критично по сравнению со скоростью. Полученные результаты подтверждают необходимость высокой точности изготовления роторов, регулярного контроля их состояния и проведения балансировки.

Таким образом, проведённое исследование позволяет сделать вывод о том, что неуравновешенность ротора является важным фактором, определяющим уровень вибрации и надежность работы турбомашин. Контроль параметров, своевременная диагностика и соблюдение требований стандартов позволяют существенно снизить риск возникновения аварийных ситуаций и повысить эффективность эксплуатации оборудования.

Список литературы:

1. Кудрявцев, В. Н. Турбины тепловых и атомных электростанций: учебник для вузов / В. Н. Кудрявцев. – Москва: Энергоатомиздат, 2008. – 368 с.
2. Болтин, В. В. Основы теории турбомашин: учебное пособие / В. В. Болтин. – Москва: Машиностроение, 2007. – 280 с.
3. ГОСТ ISO 1940-1-2007. Вибрация. Требования к качеству балансировки роторов в постоянном (жестком) состоянии. Часть 1. Определение допустимых остаточных дисбалансов. – Введ. 2008-01-01. – Москва: Стандартиформ, 2008. – 24 с.
4. Богомолов, А. В. Диагностика вибрации машин и оборудования / А. В. Богомолов. – Санкт-Петербург: Питер, 2010. – 320 с.
5. Райзер, Ю. П. Вибрация и надежность турбомашин / Ю. П. Райзер. – Москва: Машиностроение, 2005. – 256 с.
6. Кравченко, В. И. Вибрационные процессы в энергетических машинах: монография / В. И. Кравченко. – Москва: МЭИ, 2015. – 312 с.

©Казачкина А. А., Китаева Р. Р., 2026

ИИ-АГЕНТЫ КАК ДИСПЕТЧЕРЫ: АВТОНОМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ БЕЗ УЧАСТИЯ ЧЕЛОВЕКА

студент **Карпов Родион Александрович**,
науч. руководитель: канд. экон. наук, доцент **Рахимова Гузель Салихзяновна**,
Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева – КАИ,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В статье исследуется применение автономных ИИ-агентов в роли диспетчеров промышленных процессов. Анализируются архитектуры мультиагентных систем (MAC) и методы многоагентного обучения с подкреплением (MARL). Показано, что ИИ-агенты превосходят традиционные эвристические методы планирования в динамических производственных средах. Рассмотрены кейсы практического внедрения, выявлены ограничения автономного управления без участия человека.

Ключевые слова: ИИ-агент, мультиагентные системы, обучение с подкреплением, диспетчеризация, промышленная автоматизация, умное производство, Индустрия 4.0.

AI AGENTS AS DISPATCHERS: AUTONOMOUS CONTROL OF INDUSTRIAL PROCESSES WITHOUT HUMAN INVOLVEMENT

Student **Karpov Rodion Alexandrovich**,
Academic Advisor: PhD in Economics, Associate Professor
Rakhimova Guzel Salikhzyanovna,
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The paper examines the use of autonomous AI agents as industrial process dispatchers. Multi-agent system (MAS) architectures and multi-agent reinforcement learning (MARL) algorithms are analyzed. AI agents are shown to outperform traditional heuristic scheduling methods in dynamic production environments. Practical implementation cases are reviewed and key limitations of fully autonomous control are identified.

Keywords: AI agent, multi-agent systems, reinforcement learning, dispatching, industrial automation, smart manufacturing, Industry 4.0.

Представим себе крупный машиностроительный завод: сотни заготовок, десятки станков, переменные приоритеты заказов. Человек-диспетчер в такой системе работает на пределе когнитивных возможностей – и всё равно принимает решения медленнее, чем изменяется ситуация. SCADA-платформы и ПЛК-контроллеры фиксируют показатели в реальном времени, но интерпретировать их и реагировать всё равно должен оператор. По мере усложнения производственных

цепочек этот разрыв между скоростью событий и скоростью принятия решений становится критичным.

Именно здесь ИИ-агенты открывают принципиально новые возможности. Речь идёт о программных системах, способных самостоятельно наблюдать за производственной средой, анализировать поток данных от датчиков и принимать диспетчерские решения – без ожидания команды оператора. В этой статье мы рассмотрим, как устроены такие системы, почему мультиагентные архитектуры оказываются предпочтительными и что происходит, когда подобные решения встречаются с реальным производством.

ИИ-агент как диспетчер: концепция и архитектура

ИИ-агент в промышленном контексте – это не чат-бот и не инструмент анализа данных. Агент воспринимает среду через сенсоры (датчики оборудования, сигналы ERP, данные о заказах), выстраивает внутреннее представление о её состоянии и выбирает действие, максимально продвигающее его к цели. В задаче диспетчеризации это означает: непрерывно отслеживать статус оборудования, длины очередей и приоритеты заказов – и отвечать на вопрос, какую операцию выполнять следующей.

Но один агент – ещё не решение. На сложном предприятии с десятками участков более органичным выбором оказывается мультиагентная архитектура, где каждый цех или обрабатывающий центр управляется своим агентом. Они взаимодействуют через протоколы координации – контрактные сети (Contract Net Protocol), аукционные механизмы – согласовывая решения без единого командного центра. Примечательно, что именно децентрализованность делает систему устойчивой: выход одного агента из строя не блокирует остальных [1].

По уровню автономности агенты делятся на несколько классов, хотя границы между ними размыты. Реактивные агенты не моделируют среду – просто отвечают на сигналы, и делают это очень быстро. Делиберативные строят внутреннюю модель производства и планируют цепочки действий; они медленнее, зато решают более сложные задачи. Гибридные агенты берут лучшее из обоих подходов: быстро реагируют на срочные сбои и параллельно ведут долгосрочную оптимизацию – именно такая архитектура стала практическим стандартом, особенно когда к ней добавляют машинное обучение, позволяющее агентам улучшать политику решений по мере накопления реального опыта.

Многоагентное обучение с подкреплением в производственном планировании

MARL, или многоагентное обучение с подкреплением, стало стандартным инструментом для обучения таких систем. Принцип работы: каждый агент взаимодействует со средой, наблюдает её состояние, выбирает действие, получает сигнал вознаграждения – и постепенно учится, какие решения в каких ситуациях приводят к лучшему результату. Для диспетчерских задач пространство состояний включает длины очередей, приоритеты заказов и загрузку оборудования; пространство действий – выбор следующей операции для обработки.

Насколько всё это работает на практике? Исследование Zhou et al. даёт конкретный ответ. Авторы внедрили MARL-планировщики в киберфизическую систему job-shop производства [4]: каждый агент управлял отдельным узлом и получал данные датчиков в реальном времени. При поломке оборудования или

поступлении срочного заказа система перестраивалась без перепрограммирования. Сравнение со стандартным плановым методом компании показало преимущество по пропускной способности, задержкам и загрузке оборудования.

Отдельного внимания заслуживает интеграция графов знаний с MARL [5]. Чистый RL-агент обучается на данных и не знает о предметной области ничего до начала обучения. Если добавить семантическое представление инженерных знаний: правил, зависимостей, типичных сценариев, – агент начинает лучше справляться с ситуациями, которых не было в обучающей выборке. Для производств с частой сменой ассортимента это не опция, а необходимость.

Масштабный обзор [8], охвативший более 40 промышленных внедрений MARL, позволяет сделать обобщение: агентные системы выигрывают прежде всего там, где есть высокая вариативность, частые незапланированные сбои и несколько конкурирующих целей одновременно. Традиционные правила хорошо работают в предсказуемых условиях, а таких условий на современном производстве становится всё меньше.

LLM-агенты в производственных мультиагентных системах

Интеграция больших языковых моделей в МАС – направление сравнительно новое, но многообещающее. Ключевое отличие от традиционного агента: LLM-агент не ограничен жёсткими протоколами обмена данными. Он может получить от оператора инструкцию на обычном языке – «перепланируй участок 4, у нас сдвинулась поставка» – и разобраться с ней самостоятельно, без формализованной команды.

Lim et al. показали, что LLM-агенты особенно ценны в нестандартных ситуациях [2]. Когда стандартные протоколы не покрывают случившегося, языковой агент рассуждает от первых принципов и генерирует реакцию на основе контекста. По мнению авторов настоящей статьи, именно эта способность – работать с неформализованным знанием – является наименее оценённым преимуществом LLM в промышленных применениях. Классический RL-агент в такой ситуации просто не знает, что делать.

Практические результаты внедрения агентных систем

Перейдём от теории к числам. На керамическом производстве была развёрнута мультиагентная система прогнозного мониторинга [6]: точность предсказания отказов составила 94 %, количество ложных срабатываний сократилось на 67 %, незапланированные простои – на 43 %. При этом система использовала федеративное обучение: агенты на разных участках обучались совместно, не передавая соседним узлам сырые операционные данные. Последнее немаловажно – промышленные предприятия, как правило, крайне осторожны с передачей производственных данных за пределы своей инфраструктуры.

Исследование IFAC [7] подтвердило другое принципиальное преимущество: МАС не требует перенастройки при изменении ассортимента или объёмов. Обычная система планирования в такой ситуации нуждается во вмешательстве технолога – агенты адаптируются самостоятельно. Это не магия, а следствие того, что они обучены работать именно в условиях вариативности.

Оба обзора [1, 8] сходятся в одном: агентный подход уже перестал быть сугубо академической темой. Области применения – от управления отдельными

станками до координации IoT-инфраструктуры – свидетельствуют об устойчивом переходе технологии в промышленную практику.

Ограничения и направления дальнейших исследований

Картина была бы неполной без разговора об ограничениях. Первая и, пожалуй, главная проблема – интерпретируемость. Глубокий RL-агент принимает решения, логику которых трудно объяснить: производственный менеджер видит результат, но не понимает, почему агент выбрал именно этот порядок операций. В регулируемых отраслях – авиационной, фармацевтической – это способно стать непреодолимым барьером для внедрения.

Требования к данным тоже нетривиальны. MARL-системе нужна объёмная историческая база, причём охватывающая разнообразные производственные сценарии – не только штатные. Если условия на предприятии существенно меняются, агент, обученный на старых данных, может деградировать, и владелец системы не всегда заметит это вовремя. Ещё один практический барьер – интеграция с унаследованным оборудованием: большинство заводов работают в смешанной среде с контроллерами разных эпох и поставщиков [3], и подключение агентного слоя к такой инфраструктуре требует немалых инженерных усилий.

Перспективные направления достаточно очевидны: объяснимый ИИ (XAI), трансферное обучение, стандартизированные API для интеграции с промышленным оборудованием. Концепция «человек в петле» (human-in-the-loop) уже активно разрабатывается – идея в том, чтобы агент работал автономно в штатных ситуациях, но немедленно передавал управление оператору, когда ситуация выходит за границы знакомого.

Агентные системы управления производством – не будущее, а уже происходящее настоящее. Цифры из реальных внедрений говорят сами за себя: минус 43 % незапланированных простоев, самостоятельная реадаптация при смене ассортимента, координация десятков производственных узлов без единого диспетчера. Вопрос больше не в том, справляются ли ИИ-агенты с задачами промышленной диспетчеризации – справляются. Вопрос в том, как преодолеть барьеры внедрения: недоверие к решениям «чёрного ящика», нехватку качественных обучающих данных и сложность работы со старым оборудованием. Дальнейшие исследования в области объяснимого ИИ и трансферного обучения, по всей видимости, определяют скорость этого перехода.

Список литературы:

1. Piccialli, F., Chiaro, D., Sarwar, S. et al. (2025) AgentAI: A Comprehensive Survey on Autonomous Agents in Distributed AI for Industry 4.0. Expert Systems with Applications. 291, Art. 128404. DOI: 10.1016/j.eswa.2025.128404.
2. Lim, J., Vogel-Heuser, B., Kovalenko, I. (2024) Large Language Model-Enabled Multi-Agent Manufacturing Systems. arXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/2406.01893> (date accessed: 20.03.2026).
3. Bahrpeyma, F., Reichelt, D. (2022) A Review of the Applications of Multi-Agent Reinforcement Learning in Smart Factories. Frontiers in Robotics and AI. 9. DOI: 10.3389/frobt.2022.1027340.

4. Zhou, T., Tang, D., Zhu, H., Zhang, Z. (2021) Multi-Agent Reinforcement Learning for Online Scheduling in Smart Factories. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 72, Art. 102202. DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102202.
5. Qin, L. (2024) Knowledge Graph-Enhanced Multi-Agent Reinforcement Learning for Adaptive Scheduling in Smart Manufacturing. Journal of Intelligent Manufacturing. DOI: 10.1007/s10845-024-02494-0.
6. (2025) Agentic AI in Smart Manufacturing: Enabling Human-Centric Predictive Maintenance Ecosystems. Applied Sciences. 15 (21), Art. 11414. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/21/11414> (date accessed: 20.03.2026).
7. (2018) Potential of a Multi-Agent System Approach for Production Control in Smart Factories. IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51, No. 11. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318314332> (date accessed: 20.03.2026).
8. (2025) Reinforcement Learning for Single-Agent to Multi-Agent Systems: A Survey. Artificial Intelligence Review. DOI: 10.1007/s10462-025-11439-9.

Примечание. При написании статьи были применены технологии искусственного интеллекта.

© Карпов Р. А., 2026

УСТРОЙСТВА КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ КАК АЛЬТЕРНАТИВА СИСТЕМАМ 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 причин, следствий и путей защиты от аварийных отключений и просадок напряжения в цепях питания промышленных предприятий и иных критически важных потребителей. Описываются недостатки в эксплуатации существующих систем, призванных защитить потребителей от перебоев в питающих цепях. Приводятся примеры способов компенсации данных недостатков.

Ключевые слова: автоматический ввод резерва, резервный источник питания, дизель-генераторная установка, электросеть, система автоматического повторного включения, провал напряжения, суперконденсатор.

VOLTAGE DROP COMPENSATION DEVICES AS AN ALTERNATIVE TO AUTOMATIC RESERVE INPUT SYSTEMS

Postgraduate Student **Kravchuk Artem Alexeyevich**,
Academic Advisor: PhD in Engineering, Associate Professor
Domanov Viktor Ivanovich,
Ulyanovsk State Technical University,
Ulyanovsk, Russian Federation

Abstract. This paper provides an analysis of the causes, effects, and ways to protect against emergency shutdowns and voltage drawdowns in the power supply circuits of industrial enterprises and other critical consumers. The disadvantages of operating existing systems designed to protect consumers from power outages are described. Examples of ways to compensate for these shortcomings are given.

Keywords: automatic reserve input, backup power supply, diesel generator set, power grid, automatic restart system, voltage drop, supercapacitor.

Системы автоматического включения резерва (АВР) широко используются в электрических сетях для быстрого возобновления подачи питания на потребители при провалах напряжения и иных сбоях. Эти системы автоматически переключают потребителей на запасные источники питания, когда есть опасность отказа оборудования при питании от основного. Применение АВР позволяет поддерживать непрерывную работу оборудования на предприятиях и иных потребителях. На современных предприятиях системы АВР предотвращает

остановку конвейеров вследствие ошибки питания систем промышленной автоматики.

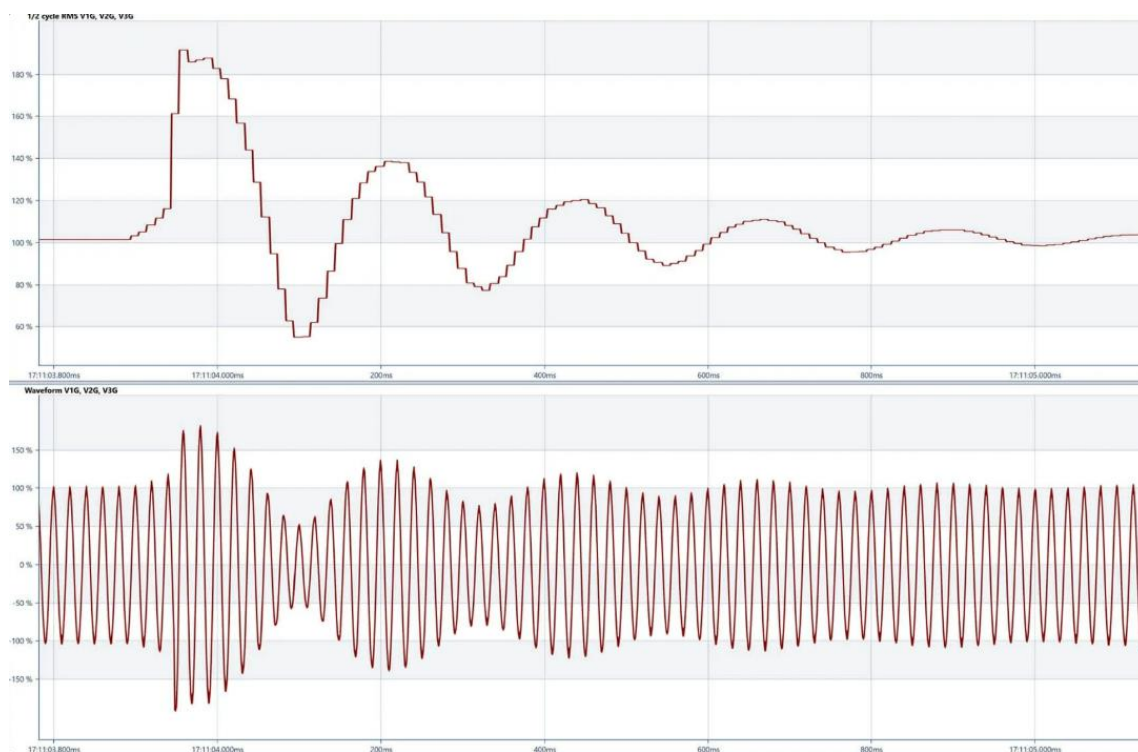


Рисунок 1. Осциллограмма провала напряжения

В больницах они обеспечивают питание критически важных потребителей. На подстанциях такие системы поддерживают собственные нужды. Системы автоматического повторного включения (АПВ) дополняют АВР. Они используются для повторной подачи питания после кратковременных просадок.

Тем не менее, у обычных систем АВР и АПВ есть важные недостатки. Основной недостаток – это слишком долгое время срабатывания. Система не успевает быстро отреагировать, в результате чего оборудование останавливается вследствие ошибок в цепях питания систем промышленной автоматизации. Из-за этого останавливаются отдельные устройства и целые технологические процессы на современных промышленных предприятиях. Нарушения в производстве приводят к ухудшению качества производимой продукции и убыткам из-за простоя предприятия. Для многих предприятий убытки от краткосрочных перебоев питания и необходимостью последующего запуска производства сопоставимы с убытками от длительных аварийных остановок.

По сравнению с современными решениями, такими как накопители энергии, обычные АВР показывают меньшую эффективность при кратковременных провалах напряжения. Они предназначены для полных отключений, но не справляются с кратковременными просадками, что требует поиска вариантов решения этих задач.

Недостаток обычных систем АВР и АПВ, которые применяют для восстановления питания нагрузки, состоит в том, что время их срабатывания слишком велико, что приводит к невозможности быстрой реакции на перебои питания. В итоге при падении напряжения может остановиться работа нагрузки,

чувствительной к питанию, потому что даже короткие просадки напряжения выводят из строя чувствительное оборудование. Из-за таких остановок отдельных чувствительных устройств возникают проблемы в работе целых технологических комплексов на автоматизированных производствах, где все процессы связаны между собой, и одна поломка тянет за собой другие. Когда нарушается ход производственного процесса, предприятия недополучают продукцию и выпускают товары низкого качества, поскольку происходит аварийная остановка технологических, после чего требуется длительный процесс перезапуска. Для многих заводов потери от перебоев в электрических сетях вместе с необходимостью заново запускать все процессы могут сравниться с потерями от долгого полного отключения питания, ведь каждый раз приходится тратить время на проверку оборудования, настройку линий и возобновление выпуска изделий.

В настоящее время актуальным вопросом является применение на практике различного рода накопителей энергии [1]. Раньше такие источники питания применяли только для небольших нагрузок и как устройства бесперебойного питания для потребителей с малой мощностью, где хватало простых решений без больших объемов накопленной электроэнергии. В последние годы накопители энергии стали главной частью активно-адаптивных систем, которые помогают сетям работать более гибко и справляться с переменными нагрузками. Важным фактором, который влияет на изучение применения накопителей энергии в электрических системах, служит желание увеличить распределенную генерацию за счет альтернативных источников, таких как ветрогенераторы и солнечные панели для получения электроэнергии, поскольку эти источники дают энергию не постоянно, а зависят от погодных условий и времени суток. Сильное влияние оказывает и финансовая сторона. Более высокая цена на электрическую энергию в периоды большой нагрузки на сеть, когда спрос растет и поставщики поднимают тарифы. Растут требования к безопасности подачи электричества, потому что современные производства не могут себе позволить даже короткие перерывы. Главная особенность накопителей, связанная с выработкой энергии и дальнейшей ее отдачей в требуемый временной отрезок, является основным смыслом для проектирования современных концепций оптимального управления энергетическими объектами [2]. Основные направления применения накопителей энергии связаны со следующими пунктами:

1. Выравнивание потребления электричества в сети, когда энергию накапливают в моменты избытка и отдают в сеть при ее нехватке, чтобы избежать пиковых перегрузок и сделать потребление более ровным по всему дню.

2. Увеличение степени устойчивости вместе с системами, которые управляют потоком мощности и компенсируют реактивную мощность в энергосистемах, что помогает сети не утрачивать стабильность при резких изменениях.

3. Обеспечение постоянной подачи питания для важных объектов, собственных нужд подстанций и электростанций, где даже кратковременное отключение может привести к серьезным авариям или потерям.

4. Выравнивание колебаний мощности, управление работой малоинерционных распределенных источников питания, с целью избежания лишних скачков в сети.

5. Улучшение стабильности работы энергосистем, а также помощь в подключении возобновляемых источников электрической энергии к системам электроснабжения, поскольку солнечные и ветровые установки часто дают нестабильный поток.

Для всех этих пунктов важна возможность накопителя собирать и хранить энергию на протяжении необходимого периода. Кроме того, большую роль играет мощность, которую накопитель отдает за конкретный отрезок времени во время разряда, в следствии разброса мощностей нагрузок. Ключевыми характеристиками накопителя также являются коэффициент полезного действия и время его разряда, то есть умение выдавать требуемую мощность за определенный промежуток времени без лишних потерь. Конденсаторы, которые раньше входили в число типов накопителей энергии, со временем уступили место аккумуляторным батареям. Эта замена произошла вследствие большей энергоемкости последних. Важным моментом здесь служит то, что напряжение на выходе аккумулятора почти не меняется во время разряда, что делает работу системы предсказуемой. Таким образом, в использовании стабилизатора напряжения либо нет необходимости, либо его конструкция будет очень простой [3]. Одним из существенных различий между аккумуляторными батареями и конденсаторами является механизм накопления электрического заряда. В конденсаторах заряд накапливается в электростатической форме непосредственно на обкладках, тогда как аккумуляторные батареи преобразуют электрическую энергию в химическую, сохраняют её в виде химических связей и, при необходимости разряда, осуществляют обратное преобразование в электрическую энергию. Вследствие этих многократных превращений на каждом этапе происходят потери энергии. Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что конденсаторам свойственна на порядок более высокая энергетическая эффективность, однако удельная емкость относительно аккумуляторов у первых будет существенно ниже.

При рассмотрении существующих типов накопителей было установлено, что для выполнения задач недопущения провалов напряжения, удачным решением является применение суперконденсаторов. Эти устройства объединяют в себе быстроедействие, свойственное и обычным конденсаторам и высокую мощность отдачи на выходе.

В отличие от обычного конденсатора в структуре суперконденсатора присутствует двойной электрический слой, разделяющий электролит и электрод [4]. Использование этих устройств в целях накопления энергии в системах компенсации токовых провалов многократно снижает ущерб от приостановки технологических и производственных процессов, что влечет за собой и отсутствие необходимости в дорогостоящем ремонте всей электросети. Резюмируя, можно прийти к выводам, что внедрение суперконденсаторов в технологические схемы электросетей можно считать наилучшим решением проблем провалов напряжения в электросети [5]. Сравнение удельной мощности и удельной энергии накопителей энергии представлено на рисунке 2.

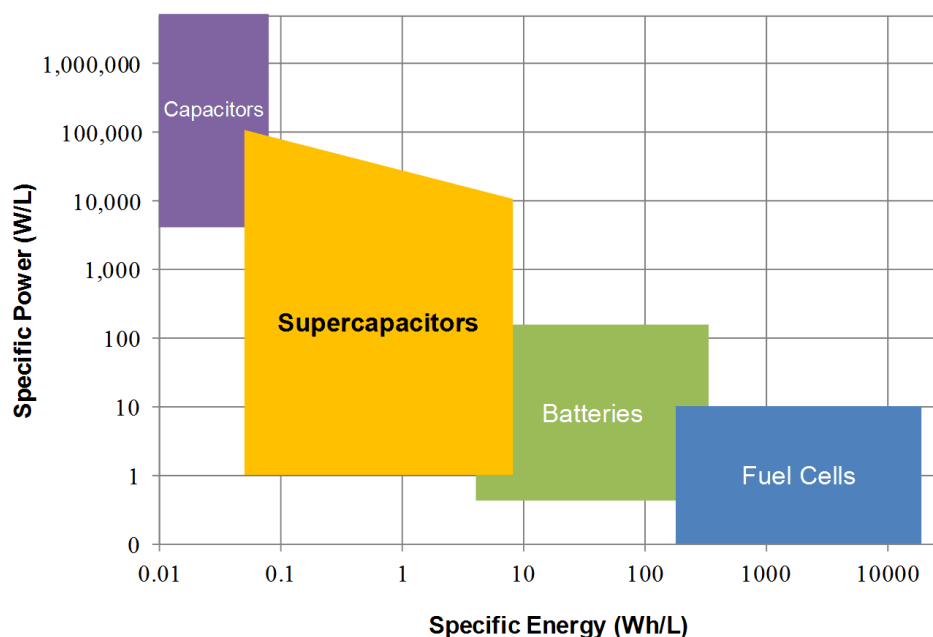


Рисунок 2. Сравнение удельной мощности и удельной энергии накопителей энергии

Применение систем автоматического ввода резерва и систем переключения, а также систем противоаварийной защиты поддерживает надежность электроснабжения многие годы. Такие системы позволяют переключить нагрузку на резервные линии при ненормальных режимах электросети. Слабым местом таких систем является ограничения по времени реакции систем ПАЗ и РЗА на ненормальные режимы работы. Частые случаи провалов напряжения, особенно короткие – меньше долей секунды, применяемые решения не обеспечивают должного быстрого действия. Результатом такой работы систем является выход из строя чувствительного производственного оборудования. Технологические процессы приостанавливаются и растут убытки, в том числе вызываемые и снижением качества продукции.

Современные системы на базе накопителей энергии, таких как суперконденсаторы обеспечивают мгновенное и незамедлительное переключение нагрузки на резервный ввод. Такие системы сохраняют в себе энергию и выводят ее в сеть в момент падения напряжения, не имея при этом такой большой задержки, как более старые системы. Как уже описывалось ранее, ввиду наличия двойного электрического слоя суперконденсаторы работают без химических процессов как побочного эффекта. Это свойство обеспечивает высокую энергетическую эффективность работы и долгий срок службы. Применение устройств на базе суперконденсаторов экономит огромные финансовые средства предприятия, не только за счет более эффективного устранения аварийных остановов технологических процессов, но и за счет эффективной интеграции альтернативных источников энергии, использующих энергию ветра и солнечную энергию, объединяя две системы генерации в единую сеть, выравнивая графики нагрузки и повышая надежность электросети.

Обобщая вышеописанное, можно отметить высокую необходимость перехода к современным устройствам накопления энергии для всех предприятий, требующих при своей работе стабильное электрическое питание. Стоит отметить

также, что чем раньше отдельно взятое предприятие внедрит устройства на базе суперконденсаторов в свою электросеть, тем большие конкурентные преимущества оно получит, так как обеспечит тем самым снижение производственных потерь, повысит свою производительность и безотказность работы оборудования. Это уже подтверждено опытом эксплуатации, тем самым открывая огромные перспективы улучшения эксплуатируемых электросетей.

Только внедрение подобных технологических решений обеспечивает по-настоящему мгновенный переходный процесс переключения, обеспечивая бесперебойность электроснабжения для любых объектов промышленности. Это экономически обоснованный и актуальный способ устранения существующих проблем, связанных с переходными процессами электрических переключений в электросетях.

Список литературы:

1. Бахтеев, К. Р. Предотвращение провалов напряжения на промышленных предприятиях при помощи накопителей электроэнергии / К. Р. Бахтеев // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: материалы VIII Международной научно-технической конференции, Самара, 02–06 октября 2017 года. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. – С. 419–420.
2. Куликов, Ю. А. Накопители электроэнергии – эффективный инструмент управления режимами электроэнергетических систем / Ю. А. Куликов // Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: материалы IX Международной молодежной научно-технической конференции. В 3-х томах, Казань, 01–05 октября 2018 года / Ответственный редактор Э. В. Шамсутдинов. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2018. – С. 38–43.
3. Гадиева, Э. А. Разработка систем резервирования с применением накопителей энергии для повышения надежности электроснабжения / Э. А. Гадиева, Н. В. Денисова // Актуальные вопросы в науке и практике: сборник статей по материалам IV Международной научно-практической конференции. В 5-ти частях, Самара, 11 декабря 2017 года. – Самара: Общество с ограниченной ответственностью «Дендра», 2017. – С. 58–62.
4. Шутенкова, О. С. Современные накопители электроэнергии / О. С. Шутенкова // Тинчуринские чтения: материалы XIV Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 23–26 апреля 2019 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. – С. 90–99.
5. Латипов, С. Т. Накопители электроэнергии как средство предотвращения нарушений электроснабжения / С. Т. Латипов. // Молодой ученый. – 2017. – № 16 (150). – С. 187–189.

© Кравчук А. А., 2026

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ РАБОТЫ ПАРОВЫХ ТУРБИН

студент **Садикова Алина Айратовна**,
студент **Ахунова Гульфия Ильфатовна**,
науч. руководитель: ассистент **Черкасов Александр Сергеевич**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматриваются современные методы повышения экономичности работы паровых турбин на тепловых электростанциях. Проведён анализ основных направлений совершенствования конструктивных и эксплуатационных характеристик турбинного оборудования. Выявлены наиболее перспективные технологии, позволяющие существенно снизить удельный расход топлива и повысить КПД паротурбинных установок в современных условиях.

Ключевые слова: паровая турбина, экономичность, КПД, тепловые электростанции, модернизация, парогазовые установки, цифровые технологии, уплотнения, лопаточный аппарат, энергосбережение.

REVIEW OF MODERN METHODS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF STEAM TURBINES

Student **Sadikova Alina Ayratovna**,
Student **Akhunova Gulfia Ilfatovna**,
Academic Advisor: Assistant Lecturer **Cherkasov Alexander Sergeevich**,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. This article examines modern methods of improving the efficiency of steam turbines at thermal power plants. The main directions for improving the design and operational characteristics of turbine equipment are analyzed. The most promising technologies are identified that can significantly reduce specific fuel consumption and increase the efficiency of steam turbine units under modern conditions.

Keywords: steam turbine, efficiency, thermal power plants, modernization, combined cycle plants, digital technologies, seals, blade apparatus, energy saving.

Введение

Паровые турбины занимают ключевое место в системе производства электрической и тепловой энергии. На долю паротурбинных установок приходится более 70 % мирового производства электроэнергии, а в Российской Федерации данный показатель превышает 60 % [1, с. 12]. В условиях роста цен на топливо, ужесточения экологических требований и высокой конкуренции на энергетических рынках повышение экономичности работы турбинного оборудования становится одной из приоритетных задач отрасли.

Экономичность паровой турбины характеризуется её внутренним относительным КПД, который для современных крупных турбин достигает 88–92 %. Тем не менее значительная часть энергии теряется из-за аэродинамических потерь в проточной части, утечек пара через уплотнения, механических потерь и ухудшения технического состояния оборудования в процессе длительной эксплуатации. Повышение КПД даже на 1–2 % обеспечивает существенную экономию топлива и снижение выбросов парниковых газов, что делает данную проблематику актуальной как с экономической, так и с экологической точки зрения [2, с. 15].

Целью данной работы является систематизация и анализ современных методов повышения экономичности паровых турбин, применяемых в отечественной и зарубежной практике.

1. Совершенствование лопаточного аппарата

Лопатки турбины являются ключевым элементом, определяющим эффективность преобразования энергии пара в механическую работу. Аэродинамические потери в проточной части составляют наибольшую долю суммарных потерь – до 60–70 % от их общей величины.

Первым направлением совершенствования лопаточного аппарата является применение трёхмерного профилирования рабочих и направляющих лопаток. Использование лопаток с переменным профилем по высоте позволяет учитывать неравномерность потока и существенно снизить вторичные течения. Методы вычислительной гидродинамики (CFD) дают возможность оптимизировать геометрию лопаток с точностью, недостижимой при традиционном двумерном проектировании [3, с. 44].

Вторым направлением является применение лопаток с контролируемой диффузией. Данный подход, заимствованный из авиационной газотурбинной техники, обеспечивает более равномерное замедление потока на стороне разрежения профиля, что снижает потери на отрыв пограничного слоя. В результате удаётся достичь более высоких аэродинамических нагрузок без ухудшения КПД ступени.

Третьим важным направлением служит оптимизация торцевых стенок ступени. Профилирование торцевых поверхностей с применением нелинейных форм позволяет управлять вторичными течениями и снизить потери в угловых зонах канала. В совокупности с трёхмерным профилированием лопаток данный метод обеспечивает прирост КПД ступени на 1,5–2,5 % [4, с. 7]. Четвёртым направлением является использование перспективных конструкционных материалов – жаропрочных сплавов на никелевой основе и керамических покрытий – для повышения допустимых рабочих температур.

2. Совершенствование уплотнений проточной части

Утечки пара через лабиринтные уплотнения являются одним из значимых источников потерь в паровой турбине. По различным оценкам, общие потери от неплотностей составляют от 2 до 5 % от располагаемой мощности турбины. Традиционные лабиринтные уплотнения с металлическими гребнями обладают существенным недостатком: при задевании гребней о корпус происходит их износ с увеличением зазоров и соответствующим ростом утечек.

Для устранения этого недостатка применяется несколько современных конструктивных решений. Уплотнения с истираемым покрытием предполагают нанесение на корпусные элементы мягкого покрытия (на основе мягких металлов или композитных материалов), которое истирается при контакте с гребнями, обеспечивая минимальный установившийся зазор на протяжении всего срока службы. Бесконтактные щёточные уплотнения, состоящие из множества тонких металлических проволочек, наклонённых под углом к оси ротора, обеспечивают снижение утечек на 50–80 % по сравнению с лабиринтными конструкциями [5, с. 219]. Уплотнения типа «пчелиные соты» создают турбулентные зоны, препятствующие движению пара через зазор, и в сочетании с уменьшенным зазором обеспечивают дополнительное снижение утечек.

3. Повышение начальных параметров пара

Одним из наиболее эффективных методов повышения КПД паротурбинного цикла является увеличение начальных параметров пара – давления и температуры. В соответствии с термодинамикой цикла Ренкина, повышение начальных параметров пара при прочих равных условиях увеличивает термический КПД цикла: повышение давления с 16 до 30 МПа позволяет повысить КПД цикла на 4–6 %, повышение температуры с 540 до 620 °С – ещё на 2–3 %.

Современные энергоблоки сверхкритических (СК) и ультрасверхкритических (УСК) параметров работают при давлении пара 25–30 МПа и температуре 580–620 °С. Переход от суперкритических к ультрасверхкритическим параметрам позволяет увеличить КПД энергоблока с 42–44 % до 46–48 %. В ряде европейских стран ведутся разработки энергоблоков с температурой пара до 700 °С и давлением до 35 МПа [6, с. 97].

Применение промежуточного перегрева пара снижает влажность пара в последних ступенях цилиндра низкого давления, что уменьшает эрозионный износ лопаток и повышает КПД влажнопаровых ступеней. Двойной промежуточный перегрев, применяемый на ряде современных энергоблоков, обеспечивает дополнительный прирост КПД на 1–2 % по сравнению с одинарным перегревом.

4. Парогазовые установки как метод повышения экономичности

Использование парогазовых установок (ПГУ) представляет собой наиболее радикальный способ повышения экономичности производства электроэнергии с применением паровых турбин. В ПГУ тепло уходящих газов газовой турбины используется в котле-утилизаторе для производства пара, подаваемого в паровую турбину. Таким образом, в одной установке реализуются два термодинамических цикла – цикл Брайтона и цикл Ренкина.

КПД современных ПГУ достигает 58–62 %, что существенно превосходит КПД традиционных паротурбинных электростанций (40–44 %). Применение схем с тремя давлениями пара и промежуточным перегревом в котле-утилизаторе позволяет максимально полно использовать тепло уходящих газов и приблизить КПД ПГУ к теоретическому пределу [7, с. 21].

Перспективным направлением является также применение схем с внутрицикловой газификацией угля (IGCC), позволяющих использовать твёрдое топливо при высоких значениях КПД и пониженных выбросах загрязняющих веществ. По прогнозам специалистов, КПД установок IGCC при использовании передовых газовых турбин в перспективе может превысить 55 %.

5. Применение цифровых технологий и систем мониторинга

Применение цифровых технологий открывает принципиально новые возможности для повышения экономичности паровых турбин без значительных капиталовложений в физическую модернизацию оборудования. Системы непрерывного мониторинга технического состояния позволяют своевременно выявлять деградацию отдельных элементов и принимать меры по восстановлению проектных характеристик.

Технология цифровых двойников (Digital Twin) предполагает создание виртуальной модели турбины, точно воспроизводящей её поведение в реальных условиях эксплуатации. На основе данных от датчиков и численных моделей цифровой двойник позволяет прогнозировать поведение оборудования, оптимизировать режимы его работы и планировать техническое обслуживание [8, с. 34]. Крупнейшие мировые производители турбинного оборудования – Siemens Energy, GE, «Силовые машины» – активно внедряют данную технологию.

Системы автоматического управления на базе методов машинного обучения обеспечивают оптимизацию режима работы турбины в реальном времени. Алгоритмы способны выявлять закономерности в больших массивах эксплуатационных данных и предлагать оптимальные настройки системы управления, обеспечивающие минимальный расход топлива при заданной нагрузке [9, с. 24]. Внедрение систем предиктивного технического обслуживания позволяет перейти от планово-предупредительного ремонта к обслуживанию по фактическому состоянию, снижая затраты и вынужденные простои оборудования.

6. Модернизация находящегося в эксплуатации оборудования

Значительная часть паровых турбин, эксплуатируемых на отечественных электростанциях, введена в работу в 1970–1990-е годы и имеет технический и моральный износ. Модернизация такого оборудования является экономически эффективным способом повышения его производительности без полной замены агрегата. Согласно имеющимся данным, стоимость модернизации составляет от 20 до 40 % стоимости нового оборудования, тогда как прирост мощности и КПД сопоставим с полной заменой турбины.

Основными направлениями модернизации являются: замена проточной части новыми ступенями с оптимизированной аэродинамикой; установка современных конструкций уплотнений; применение новых систем автоматического регулирования и защит; оптимизация тепловой схемы электростанции. Комплексная модернизация паровой турбины позволяет повысить её мощность на 5-15 % и снизить удельный расход тепла на 2–6 % [10, с. 146].

При выборе объёма и методов модернизации важно учитывать технико-экономические показатели: капитальные затраты на модернизацию, ожидаемый прирост выработки электроэнергии, сроки окупаемости инвестиций. Как правило, при сроке эксплуатации турбины более 20–25 лет и достаточном остаточном ресурсе основных узлов модернизация значительно выгоднее полной замены агрегата.

Заключение

Проведённый анализ современных методов повышения экономичности паровых турбин позволяет сделать следующие основные выводы.

Аэродинамическое совершенствование лопаточного аппарата с применением методов трёхмерного проектирования и CFD-расчётов является одним из наиболее эффективных направлений, обеспечивающим прирост КПД ступеней на 1,5–2,5 %. Внедрение современных конструкций уплотнений (щёточных, истираемых, сотовых) снижает потери от утечек пара на 50–80 %, что даёт ощутимый вклад в повышение общей экономичности установки.

Повышение начальных параметров пара до сверхкритических и ультрасверхкритических значений обеспечивает значительный рост термического КПД цикла и является приоритетным направлением при создании новых энергоблоков. Применение парогазовых технологий позволяет достичь КПД 58–62 %, что существенно превышает показатели традиционных паротурбинных установок.

Цифровые технологии – системы мониторинга, цифровые двойники, предиктивное техническое обслуживание, оптимизация режимов работы – открывают новые возможности для повышения экономичности оборудования без его физического изменения. Модернизация действующего оборудования представляет экономически эффективный инструмент в условиях ограниченности инвестиционных ресурсов. Комплексное применение перечисленных методов создаёт условия для существенного снижения удельного расхода топлива и повышения конкурентоспособности отечественных тепловых электростанций.

Список литературы:

1. Щегляев, А. В. Паровые турбины / А. В. Щегляев. – Москва: Энергоатомиздат, 2012. – 560 с.
2. Ефимов, А. В. Анализ потерь в паровых турбинах тепловых электрических станций / А. В. Ефимов, А. Л. Гончаренко // Энергетика: экономика, технологии, экология. – 2021. – № 2. – С. 14–22. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46123784> (дата обращения: 10.03.2026). – EDN SRQHVB.
3. Зарянкин, А. Е. Повышение КПД ступеней паровых турбин методами трёхмерного профилирования лопаток / А. Е. Зарянкин, Б. Е. Лобанов // Теплоэнергетика. – 2020. – № 5. – С. 42–51. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43895632> (дата обращения: 10.03.2026). – EDN TPWXYZ.
4. Иванов, В. Л. Оптимизация проточной части паровой турбины с применением методов вычислительной гидродинамики / В. Л. Иванов, С. М. Кириллов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 3–15. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47382956> (дата обращения: 10.03.2026). – EDN MVKPQR.
5. Костюк, А. Г. Турбины тепловых и атомных электрических станций / А. Г. Костюк, В. В. Фролов, А. Е. Булкин, А. Д. Трухний. – Москва: Издательство МЭИ, 2016. – 564 с.
6. Трухний, А. Д. Стационарные паровые турбины: учебное пособие / А. Д. Трухний. – Москва: Энергоатомиздат, 2017. – 640 с.
7. Бойко, Е. А. Парогазовые установки: принципы работы, конструкция и перспективы применения / Е. А. Бойко, И. А. Паршуков // Теплоэнергетика. – 2021.

– № 8. – С. 18–27. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46895412> (дата обращения: 12.03.2026). – EDN NCRTMU.

8. Новиков, П. А. Цифровые двойники паровых турбин: возможности и перспективы применения / П. А. Новиков, Е. С. Фёдорова // Электрические станции. – 2023. – № 3. – С. 31–40. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50214763> (дата обращения: 12.03.2026). – EDN DLWPQF.

9. Сидоров, К. Р. Применение методов машинного обучения для оптимизации режимов работы турбоагрегатов / К. Р. Сидоров, О. И. Власова // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 11. – С. 22–29. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49105827> (дата обращения: 14.03.2026). – EDN BPKRTA.

10. Гиршфельд, А. Я. Режимы работы и эксплуатация паровых турбин / А. Я. Гиршфельд, Г. А. Монахов. – Москва: Энергоатомиздат, 2018. – 288 с.

© Садикова А. А., Ахунова Г. И., 2026

ПРОБЛЕМА СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

студент **Паршин Никита Александрович**,
студент **Финапетов Максим Игоревич**,
науч. руководитель: ст. преподаватель **Краснова Наталья Петровна**,
ФГБОУ ВО «СамГТУ»,
г. Самара, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена анализу ключевых проблем и ограничений, возникающих при разработке и внедрении технологий цифровых двойников в теплоэнергетической отрасли. Актуальность темы обусловлена их высоким потенциалом для оптимизации режимов тепловых сетей, прогнозирования отказов оборудования и повышения энергоэффективности, однако массовое применение технологии сдерживается комплексом факторов. Уделяется внимание проблеме адекватности цифрового двойника реальному объекту во времени: эксплуатационные факторы приводят к быстрому расхождению модели с реальностью при отсутствии автоматической адаптации.

Ключевые слова: цифровой двойник, энергомоделирование, термодинамика, теплообмен, гибридное моделирование.

THE PROBLEM OF CREATING DIGITAL TWINS IN THERMAL POWER ENGINEERING

Student **Parshin Nikita Aleksandrovich**,
Student **Finapetov Maxim Igorevich**,
Academic Advisor: Senior Lecturer **Krasnova Natalya Petrovna**,
Samara State Technical University,
Samara, Russian Federation

Abstract. This article analyzes the key challenges and limitations encountered in the development and implementation of digital twin technologies in the heat and power industry. The topic is relevant due to their high potential for optimizing heating network operations, predicting equipment failures, and improving energy efficiency. However, widespread adoption of this technology is hampered by a number of factors. The issue of digital twin fidelity to the real asset over time is highlighted: operational factors lead to rapid divergence between the model and reality in the absence of automatic adaptation.

Keywords: digital twin, energy modeling, thermodynamics, heat transfer, hybrid modeling.

За последние годы цифровые двойники (ЦД) из маркетингового термина превратились в реальный инженерный инструмент, который начинают внедрять на электростанциях, ТЭЦ и в тепловых сетях. Исследования показывают, что переход от статичной нормативной документации к динамическому моделированию

оборудования ТЭЦ позволяет существенно снизить ошибки оценки режимов и технологических минимумов. При этом практика сразу вскрывает «узкие места»: чтобы цифровой двойник не остался красивой картинкой, нужно научиться достаточно точно воспроизводить реальное поведение теплоносителя и оборудования в широком диапазоне режимов [1].

Ряд авторов описывает первые успешные проекты по созданию цифровых двойников участков тепловых сетей на базе физических стендов и программных пакетов Matlab/Simulink, ZuluThermo и SimInTech, где моделирование опирается на реальную экспериментальную верификацию. Такие работы хорошо демонстрируют, насколько чувствителен результат к качеству математической модели теплоносителя, корректному описанию теплопотерь и гидравлических сопротивлений. Одновременно промышленные решения для электростанций делают ставку на детализированное энергомоделирование, которое позволяет проводить сценарный анализ, оптимизировать режимы и сокращать топливные затраты, но требуют достаточно сложной калибровки по эксплуатационным данным [2].

Интерес к теме виден и со стороны патентной активности в теплоэнергетике: специализированные установки для гидродинамического нагрева жидкостей, а также методы преобразования тепловой энергии в механическую часто используют нетривиальные режимы течения и изменения термодинамических свойств рабочей среды. Эти разработки напрямую поднимают вопрос: насколько полно мы можем воспроизвести реальные термодинамические и гидродинамические характеристики жидкости в математической модели, пригодной для использования «онлайн» в составе цифрового двойника [3]. По сути, каждый такой патент *implicitly* задаёт инженерам задачу: построить цифровой двойник, который будет корректно описывать именно тот, «нестандартный» режим работы, ради которого подан патент.

Отдельная линия исследований посвящена применению цифровых двойников и киберфизических систем на объектах генерации тепловой и электрической энергии, где подчёркивается необходимость комплексного учёта быстрых переходных процессов, деградации оборудования и ошибок измерений. Авторы отмечают, что даже при использовании продвинутых методов машинного обучения остаточные ошибки моделей и данных неизбежны, и их приходится компенсировать за счёт адаптивной калибровки и «подпитки» модели эксплуатационной статистикой. На практике это превращается в серьёзный технический и математический вызов: модель должна быть одновременно достаточно физически обоснованной, чтобы не уходить в произвольную аппроксимацию, и достаточно простой, чтобы её можно было считать в почти реальном времени [4].

Таким образом, проблема создания двойников в теплоэнергетике оказывается гораздо глубже, чем просто разработка очередного программного комплекса. Ключевой вопрос – как на инженерно приемлемом уровне сложности описать реальную жидкость с её нелинейными термодинамическими и гидродинамическими характеристиками в условиях турбулентности, фазовых переходов и переменных нагрузок. Именно эта связка «реальная физика – ограниченные вычислительные ресурсы – жёсткие требования по точности»

формирует основные технические и математические вызовы, которым и посвящены следующие разделы работы.

Цифровые двойники в теплоэнергетике требуют точного воссоздания сложных физических процессов, особенно для реальных жидкостей в термодинамике и гидродинамике. Технические и математические вызовы возникают из-за нелинейности моделей, вычислительной сложности и необходимости верификации на реальных данных. Ниже детально рассмотрены ключевые аспекты.

Интеграция с устаревшим оборудованием – основная проблема: тепловые сети часто имеют legacy-компоненты, несовместимые с IoT-датчиками для реального времени. Кибербезопасность критически важна, поскольку двойники получают данные от датчиков, рискуя сбоями или взломами, что приводит к ошибочным прогнозам. Масштабируемость усложняется: CFD-моделирование (computational fluid dynamics) для трубопроводов требует суперкомпьютеров, а верификация на стендах (например, в Matlab Simulink) не всегда переносима на полные системы [5].

Моделирование термодинамики жидкостей включает системы нелинейных дифференциальных уравнений материального и теплового балансов, описывающих фазовые переходы, тепломассообмен и кинетику. Для многокомпонентных смесей (вода-пар в котлах) двойники должны учитывать широкий диапазон условий, что приводит к высоким вычислительным затратам; точные решения редки и используются для тестов. Проблема – нелинейность: стандартные уравнения Навье-Стокса упрощаются, но теряют точность при турбулентности или переменных нагрузках.

Воссоздание реальной жидкости в двойниках – ключевая сложность: после колен или в турбулентных потоках поля скоростей искажаются, требуя CFD для оптимизации размещения расходомеров. Точные решения уравнений гидродинамики (вихревые потоки в силовых полях) помогают редуцировать модели, но для виртуальных экспериментов нужны классы аналитических решений, которых недостаточно для сложных геометрий ТЭС. Двойники прогнозируют гидравлику в реальном времени, но погрешности данных (давление, температура) снижают точность предиктивной калибровки [6].

Таблица 1. Проблемы моделирования

Вызов	Математическая основа	Пример проблемы в теплоэнергетике
Турбулентность	Навье-Стокса	Поля скоростей после колена
Тепломассообмен	Нелинейные ДУ баланса	Фазовые переходы в котлах
Вычислительная нагрузка	CFD/FEM	Масштаб теплосетей
Верификация	Точные решения	Вихревые потоки

Гибридные подходы сочетают машинное обучение с физическими моделями для обработки больших данных и прогнозирования отказов. Использование FMEA и FEA позволяет моделировать деформации, теплообмен и гидродинамику. Перспективы – суперкомпьютеры для динамических двойников, обеспечивающих близкое к реальному времени моделирование.

Цифровые двойники в теплоэнергетике дают ощутимые выгоды: они позволяют прогнозировать отказы оборудования за счёт анализа данных с датчиков в реальном времени, снижая простои на 20–30 % и оптимизируя топливные расходы. Например, на ТЭЦ моделирование переходных режимов котлов помогает точно рассчитывать технологические минимумы, избегая перерасхода пара или воды, что особенно важно при интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в гибридные системы. Кроме того, двойники упрощают обучение персонала через виртуальные сценарии аварий, повышая безопасность без риска для реального оборудования [7].

С точки зрения перспектив, развитие технологий ИИ и больших данных открывает путь к полностью автономным системам управления: гибридные модели (физические + ML) уже успешно предсказывают гидравлику теплосетей с точностью до 95 % после калибровки. В России проекты оптимизации режимов ТЭЦ с помощью ZuluThermo и SimInTech показывают, как отечественные платформы могут конкурировать с Siemens или GE Digital, снижая зависимость от импортного ПО. Будущие направления – интеграция с квантовыми вычислениями для сверхточного CFD-моделирования турбулентных потоков и стандартизация данных по ГОСТам для масштабирования на всю энергосистему. В итоге, инвестиций в двойники окупаются за 1–2 года за счёт роста энергоэффективности на 5–10% и сокращения эксплуатационных затрат.

Таблица 2. Решения в использовании ЦД

Преимущество	Ожидаемый эффект	Пример применения
Прогноз отказов	Снижение простоев 20–30 %	Котлы ТЭЦ
Оптимизация режимов	Экономия топлива 5–10 %	Тепловые сети
Виртуальное обучение	Повышение безопасности	Аварийные сценарии
Масштабируемость	Автономное управление	Гибридные HRES

Создание цифровых двойников в теплоэнергетике сталкивается с серьёзными вызовами: от технических проблем интеграции legacy-оборудования и обеспечения кибербезопасности до математических сложностей моделирования нелинейной термодинамики и гидродинамики реальных жидкостей, включая турбулентные потоки и фазовые переходы. Несмотря на это, преимущества в виде повышения надёжности, энергоэффективности и снижения затрат уже доказаны экспериментами на стендах и пилотных проектах теплосетей, а патентная активность подтверждает растущий интерес к инновационным подходам [8].

В итоге, ключ к успеху – в гибридных моделях, сочетающих точные физические уравнения (Навье-Стокса, балансы тепла) с машинным обучением для обработки неопределённостей данных, что позволит перейти от статических симуляций к полноценным «живым» двойникам. Дальнейшие исследования должны сосредоточиться на унифицированных платформах и доступных вычислительных инструментах, чтобы технология стала стандартом в отечественной теплоэнергетике, обеспечив устойчивость энергосистем к 2030 году. Эта тема не только технически увлекательна, но и стратегически важна для модернизации отрасли.

Список литературы:

1. Подходы к разработке и применению цифровых двойников энергетических систем. A-Platform. – URL: <https://a-platform.ru/articles/podkhody-k-razrabotke-i-primeneniyu-tsifrovyykh-dvoynikov-energeticheskikh-sistem> / (дата обращения: 06.04.2026).
2. Создание цифрового двойника тепловой сети в различных программных комплексах / А. В. Шишкин [и др.] // Надежность и безопасность энергетики. – 2022. – Т. 15. – № 3. – С. 166–174. – URL: [doi.org](https://doi.org/10.17073/2072-1633-2024-4-1368) (дата обращения: 06. 04. 2026).
3. Разработка цифровых двойников основного и вспомогательного оборудования ТЭС. РНФ. – 2022. – URL: <https://rscf.ru/project/23-29-00643/> (дата обращения: 07.04.2026).
4. Цифровые двойники меняют процессы управления в электроэнергетике. СО ЕЭС. – 2023. – URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/smi/2023/RUM_2023-02_bogomolov.pdf (дата обращения: 05.04.2026).
5. Гвоздяный С. Е., Мясков А. В. Российский и зарубежный опыт использования цифровых двойников в энергетике // Экономика промышленности. – 2024. – Т. 17, № 4. – С. 378–387. – URL: <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2024-4-1368> (дата обращения: 06.04.2026).
6. Зорченко Н., Тюпина Т., Радькова О., Паршутин М. Опыт General Electric по созданию цифровых двойников для энергетики // Электрические станции. – 2024. – № 1. – С. 46–52. – URL: <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2024.1110.1.007> (дата обращения: 07.04.2026).
7. Воробьев, С. Цифровой двойник в энергетике / С. Воробьев // САПР и графика. – 2023. – № 1(317). – С. 57-59. – EDN CPZRMJ.
8. Цифровые двойники электростанций и ТЭЦ – оптимизация режимов. НБИ. – URL: <https://nbiservice.ru/services/infrastrukturnye-biznes-resheniya/optimizatsiya-rezhimov-raboty-tes-tets-pgu-gtu-sozdanie-tsifrovyykh-dvoynikov/> (дата обращения: 07.04.2026).

Примечание. При написании статьи были применены технологии искусственного интеллекта.

© Паршин Н. А., Финапетов М. И., 2026

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

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

Аннотация. Экономический эффект любого проекта заключается в получении прибыли во вновь создаваемом источнике энергоснабжения или дополнительной прибыли в действующем источнике энергоснабжения. Кроме того, оценка стоимости электроэнергии от различных генерирующих технологий производится с помощью расчетов или моделирования и, как правило, востребована при сравнительном анализе генерирующих технологий или проектов электростанций по одной генерирующей технологии, а также при государственном регулировании при тарифообразовании или выделении льгот для той или иной генерирующей технологии. Методики оценки стоимости электроэнергии для обеих целей развивались в тесной взаимосвязи друг с другом, эволюционируя по мере уточнения потребностей заказчиков методик. В настоящее время в России и за рубежом в качестве критерия экономической эффективности электрических станций (в том числе ТЭС и АЭС) используется показатель LCOE.

Ключевые слова: экономическая эффективность, тепловая электростанция, удельные расходы, себестоимость, расчетная стоимость электроэнергии.

EVALUATION OF ECONOMIC PERFORMANCE INDICATORS OF THERMAL POWER PLANTS

PhD in Engineering, Associate Professor **Zlobin Vladimir Germanovich**,
St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The economic effect of any project is to make a profit in the newly created source of energy supply or additional profit in the existing source of energy supply. In addition, the cost of electricity from various generating technologies is estimated using calculations or modeling and, as a rule, is in demand in a comparative analysis of generating technologies or power plant projects using one generating technology, as well as in state regulation when setting tariffs or allocating benefits for a particular generating technology. Methods for estimating the cost of electricity for both purposes have developed in close relationship with each other, evolving as the needs of customers of the methods are clarified. Currently, in Russia and abroad, the LCOE indicator is used as a criterion for the economic efficiency of power plants (including thermal power plants and nuclear power plants).

Keywords: economic efficiency, thermal power plant, unit costs, prime cost, estimated cost of electricity.

Экономический эффект, то есть получение дополнительной прибыли от реализации проекта, направленного на внедрение научно-технических мероприятий – это результат, выраженный в денежном выражении:

- от снижения затрат на производство вырабатываемых видов энергии в источнике энергоснабжения;
- прироста производимых видов энергии (в случае расширения источника энергоснабжения);
- увеличения цены на отпускаемые виды энергии;
- снижения экологической нагрузки объекта.

Дополнительная прибыль, полученная в результате внедрения нового оборудования и технологий, по сравнению с базовым вариантом, служит источником покрытия (возврата) капитальных затрат на осуществление мероприятий проекта.

Экономическая эффективность – это соотношение экономического эффекта и затрат, направленных на его получение.

Исходя из сути экономической эффективности, для её расчета необходимо определить (рассчитать):

- во-первых, объем инвестиций (капитальных затрат), требуемый для осуществления поставленной цели;
- во-вторых, величину экономического эффекта, который будет получен на практике от внедрения мероприятий.

Экономический эффект любого проекта заключается в получении прибыли во вновь создаваемом источнике энергоснабжения или дополнительной прибыли в действующем источнике энергоснабжения.

Кроме того, оценка стоимости электроэнергии от различных генерирующих технологий производится с помощью расчетов или моделирования и, как правило, востребована в двух ситуациях:

1) сравнительный анализ генерирующих технологий или проектов электростанций по одной генерирующей технологии (для выбора одной из опций или определения оптимальной структуры энергосистемы как совокупности нескольких опций);

2) государственное регулирование при тарифообразовании или выделении льгот для той или иной генерирующей технологии.

Методики оценки стоимости электроэнергии для обеих целей развивались в тесной взаимосвязи друг с другом, эволюционируя по мере уточнения потребностей заказчиков методик.

Основной тенденцией развития энергетики является непрерывное увеличение единичных мощностей агрегатов (котлов, турбин, энергоблоков) и электростанций, что определяет непрерывное совершенствование удельных технико-экономических показателей, каковыми являются:

1) удельный расход условного топлива на 1 кВт·ч, отпущенный потребителю, $b_{отп}^y$, кг/(кВт·ч);

2) удельные капиталовложения в ТЭС на 1 кВт установленной мощности k , руб/кВт (даются нормативами ТЭП);

3) штатный коэффициент, т. е. число обслуживающего персонала на 1 МВт установленной мощности $П$, чел/МВт [2].

Только при условии снижения этих показателей параллельно с ростом энергетики могут быть обеспечены необходимые для этого роста материальные и человеческие ресурсы.

Снижение удельного расхода топлива достигается за счет применения новой техники, что связано с дополнительными капиталовложениями ΔK . Годовые издержки на эксплуатацию ТЭС равны [1]:

$$И_{\text{год}} = B_{\text{год}} \cdot Ц_{\text{т}} + E_{\text{отч}} \cdot N_{\text{уст}} + 1,4aПN_{\text{уст}}, \quad (1)$$

где первая составляющая представляет собой стоимость годового расхода топлива $B_{\text{год}}$; $Ц_{\text{т}}$ – цена топлива в перерасчете на условное, руб/т; вторая составляющая – это текущие расходы на эксплуатацию оборудования (амортизация, текущий ремонт и прочие расходы); для ТЭС $E_{\text{отч}} = 0,10 \div 0,12$; третья составляющая – расходы на оплату персонала: удельные затраты на зарплату $a = 1200 \div 1400$ тыс.руб/(чел·год); 1,4 – коэффициент, учитывающий социальное страхование и другие накладные расходы.

Себестоимость отпущенной электроэнергии равна:

$$C_{\text{э}} = И_{\text{год}} / Э_{\text{год}}^{\text{отч}}. \quad (2)$$

Дополнительные капиталовложения $\Delta K = \Delta k \cdot N_{\text{уст}}$, считаются эффективными, если выполняется условие $\Delta И_{\text{год}} / \Delta K \leq E_{\text{н}}$ – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений. Для энергетики принято $E_{\text{н}} = 0,12$. При составлении вариантов ТЭС или их элементов критерием оптимальности является значение расчетных годовых затрат:

$$З_{\text{год}} = И_{\text{год}} + E_{\text{н}} \cdot k \cdot N_{\text{уст}}. \quad (3)$$

Разделив $З_{\text{год}}$ на $Э_{\text{год}}^{\text{отч}}$, получим удельные расчетные затраты:

$$З_{\text{год}} = C_{\text{э}} + \frac{E_{\text{н}} \cdot k}{\tau_{\text{уст}}(1 - Э_{\text{с.н}})}, \quad (4)$$

где $\tau_{\text{уст}} = Э_{\text{год}} / N_{\text{уст}}$; $Э_{\text{с.н}} = (N_{\text{уст}} - N_{\text{с.к}}) / N_{\text{уст}}$.

Иначе можно записать так:

$$З_{\text{год}} = b_{\text{год}} \cdot Ц_{\text{т}} + \frac{k(E_{\text{отч}} + E_{\text{н}})}{\tau_{\text{уст}}(1 - Э_{\text{с.н}})} - \frac{1,4aП}{\tau_{\text{уст}}(1 - Э_{\text{с.н}})}. \quad (5)$$

Выбор экономически наивыгоднейшего варианта ТЭС при проектировании ведется по минимуму расчетных затрат путем сопоставления конкурирующих вариантов. При сопоставлении варианты приводятся к равному годовому отпуску

электроэнергии путем добавления к расчетным затратам варианта с меньшим отпуском электроэнергии величины $\Delta \mathcal{E}_{\text{год}} \cdot \mathcal{Z}_{\text{з.э}}$, где $\Delta \mathcal{E}_{\text{год}} = \mathcal{E}_I - \mathcal{E}_{II}$; $\mathcal{Z}_{\text{з.э}}$ – удельные расчетные затраты на замыкающую электроэнергию.

Методика расчета и определения замыкающих затрат на топливо и электроэнергию была разработана Сибирским энергетическим институтом по заданию АН РФ [3].

Замыкающие затраты характеризуют затраты в народном хозяйстве для обеспечения дополнительных потребностей в различных видах топлива и энергии по стране.

Объективно существующая ограниченность наиболее эффективных энергетических ресурсов приводит к необходимости в каждый определенный период времени вовлекать в энергетический баланс наряду со сравнительно дешёвыми и более дорогие природные источники энергии. Затратами на эти последние и оцениваются народнохозяйственные последствия изменения потребности в энергетических ресурсах, равно как и их добычи или производства. Замыкающим может быть топливо тех месторождений или бассейнов, которые в совокупности способны компенсировать колебания потребности в энергетических ресурсах, возникающие при поиске оптимального варианта ТЭС.

Выполнить замыкающие функции могут только те источники, у которых на данном этапе: а) технически возможные размеры добычи превышают требуемый уровень их использования; б) располагаемые ресурсы и качественные характеристики позволяют обеспечить достаточно широкий круг потребителей.

Замыкающие затраты на топливо определяются прямым суммированием приведенных затрат на его добычу и перевозку.

Замыкающие затраты на электроэнергию представляют собой сумму трех составляющих. Топливная составляющая затрат на электроэнергию вычисляется как произведение удельного расхода топлива для производства электроэнергии на значение замыкающих затрат используемого топлива.

Вторая составляющая – это затраты на сооружение и эксплуатацию замыкающих электростанций. Ими могут быть наиболее совершенные базисные и полупиковые конденсационные, а также специальные пиковые газотурбинные электростанции, замыкающие в данный период баланс мощности данной объединенной электроэнергетической системы.

Третья составляющая определяется затратами на распределение электроэнергии, которые существенно зависят от размещения и размеров потребителя.

В настоящее время в России и за рубежом в качестве критерия экономической эффективности электрических станций (в том числе ТЭС и АЭС) используется показатель LCOE (Levelized Cost of Energy/Electricity, LCOE) – нормированная стоимость электроэнергии на протяжении жизненного цикла энергоустановки, включая проектирование, сооружение, эксплуатацию и вывод из эксплуатации [5].

Изначально методика расчета LCOE использовалась для сравнительного анализа альтернатив при реализации коммерческих проектов сооружения или приобретения электростанций или же для оценки экономии затрат, которых удалось избежать (например, благодаря энергосберегающим технологиям).

$LCOE$ отражает стоимость вырабатываемого МВт-часа электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла энергоустановки, учитывая плановый коэффициент извлечения установленной мощности (КИУМ), капитальные расходы на строительство, операционные расходы, топливо, проценты по привлекаемым кредитам, ремонт и вывод из эксплуатации. Величина $LCOE$ представляет собой среднюю минимальную цену продажи электрической энергии, которая обеспечивает безубыточность генерирующего объекта в течение всего срока эксплуатации. Этот показатель определяется из условия возврата всех затрат на протяжении жизненного цикла энергоблока через стоимость выпускаемой продукции (электроэнергии) с учетом дисконтирования доходной и расходной частей к определенному моменту времени:

$$LCOE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{(1+a_d)^i}}{\sum_{i=1}^n \frac{W_i}{(1+a_d)^i}}, \quad (6)$$

где W_i – годовое производство продукта (электроэнергии); a_d – ставка дисконтирования; Z_i – годовые затраты; n – период жизненного цикла объекта.

Проблема использования показателя $LCOE$ для анализа экономической эффективности работы электростанций разного типа заключается в том, что не существует единой методики, которая будет строго предписывать нормативы, входящие в состав расчёта $LCOE$.

Известно, что для энергоблоков ТЭС ежегодные доходы и затраты имеют неравномерный характер. Однако при расчетах обычно принимают постоянными ожидаемые капитальные и операционные затраты, а также прогнозируемую выработку электроэнергии. Это позволяет использовать другой распространенный критерий экономической эффективности – расчетную стоимость электроэнергии ($C_{\text{э}}$) [4]. Она представляет собой частный случай показателя $LCOE$ и рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{э}} = \frac{a_r K}{Q_p \eta h} + \frac{C_{\text{тепл}}}{\eta} + C_{\text{экспл}}, \quad (7)$$

где a_r – коэффициент годовых отчислений; K – дисконтированные капитальные затраты, руб.; Q_p – тепловая мощность реактора, кВт; η – КПД нетто энергоблока; h – количество часов использования установленной мощности, ч/год; $C_{\text{тепл}}$ – стоимость тепловой энергии реактора, руб./(кВт·ч); $C_{\text{экспл}}$ – эксплуатационная оставляющая затрат в стоимости электроэнергии, руб./(кВт·ч).

Таким образом, исходя из вышесказанного, следует, что на рынке товаропроизводителей в широком ассортименте представлено теплоэнергетическое оборудование. Представленное оборудование одинаковой мощности может существенно отличаться по цене и иметь различные эксплуатационные характеристики. Как правило, более дорогое оборудование – это и более эффективное оборудование с повышенным ресурсом надежности и сроком эксплуатации. Однако следует помнить, что дорогое оборудование не всегда

отвечает критерию «цена – качество». Поэтому с целью создания наиболее эффективного и конкурентоспособного источника энергоснабжения, целесообразно на предпроектной стадии рассмотреть несколько альтернативных вариантов на базе различного теплоэнергетического оборудования и выполнить расчеты показателей экономической эффективности.

Список литературы:

1. Злобин, В. Г. Тепловые электростанции. Часть 3. Газотурбинные и парогазовые ТЭС: учебное пособие / В. Г. Злобин. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2026. – 123 с. – ISBN 978-5-91646-474-0.
2. Злобин, В. Г. Паротурбинные установки тепловых и атомных электростанций: практикум / В. Г. Злобин, М. С. Липатов. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. – 83 с.
3. Чучуева, И. А. Вычислительные методы определения удельных расходов условного топлива ТЭЦ на отпущенную электрическую и тепловую энергию в режиме комбинированной выработки / И. А. Чучуева // Наука и Образование. – МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. – 2016. – № 2. – С. 135–165.
4. Киселев, Г. П. Варианты расчета удельных показателей эффективности работы ТЭЦ: метод. пособие по курсу «ТЭС и АЭС» для студентов, обучающихся по направлению «Теплоэнергетика» / Г. П. Киселев. – Москва: Изд-во МЭИ, 2003. – 32 с.
5. Черняховская, Ю. В. Эволюция методологических подходов к оценке стоимости электроэнергии. Анализ зарубежного опыта / Ю. В. Черняховская. – «Вестник ИГЭУ». Вып. 4. – Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». – 2016. – С. 56-68.

© Злобин В. Г., 2026

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗИФИКАЦИИ ЧАСТНОГО ДОМА: КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ

студент **Бобров Данил Александрович**,
науч. руководитель: ст. преподаватель **Каширин Иван Сергеевич**,
Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова,
г. Архангельск, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ экономической эффективности перехода с дровяного отопления на газовое в частном доме. Проведен расчет затрат на отопление, определены сроки окупаемости газового оборудования. Исследование базируется на данных по дому площадью 100 м² в климатических условиях Архангельской области.

Ключевые слова: догазификация, газификация, отопление, экономическая эффективность, частный дом, сроки окупаемости.

ECONOMIC EFFICIENCY OF GASIFICATION OF A PRIVATE HOUSE: A COMPREHENSIVE ANALYSIS

Student **Bobrov Danil Alexandrovich**,
Academic Advisor: Senior Lecturer **Kashirin Ivan Sergeevich**,
Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov,
Arkhangelsk, Russian Federation

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of the economic efficiency of transition from wood heating to gas heating in a private house. The study includes calculations of heating costs and determination of payback periods for gas equipment. The research is based on data from a 100 m² house under the climatic conditions of the Arkhangelsk region.

Keywords: gasification, economic efficiency, private house, payback period.

Введение

Выбор системы отопления для частного дома – это решение, определяющее не только комфорт и уют в стенах жилища, но и долгосрочные финансовые потоки, бытовые привычки и даже образ жизни.

В целях определения источника теплоснабжения частного дома необходим комплексный анализ, который бы учитывал всю цепочку затрат и выгод: от стоимости оборудования и его монтажа до ежесезонных трат на топливо, от коэффициента полезного действия разных устройств до стоимости собственного времени домовладельца. Такой анализ позволяет выйти за рамки субъективных предпочтений и оценить экономическую целесообразность каждого варианта в конкретных условиях.

В данной статье представлено детальное сравнение на конкретном примере дома площадью 100 квадратных метров, расположенного в климатических

условиях, характерных для Архангельской области. Ключевой целью станет расчёт срока окупаемости газового подключения – того периода, после которого повышенные первоначальные вложения полностью компенсируются за счёт ежегодной экономии на топливе. Этот показатель станет объективной основой для ответа на главный вопрос: что в конечном счёте выгоднее: годами топить дровами или один раз инвестировать в газ, чтобы десятилетиями пожинать плоды этого решения.

Для отопления помещения в сильные морозы норматив тепловой мощности составляет 1 кВт на 10 м² площади. В среднем за отопительный сезон этот показатель ниже: около 0,5 кВт на 10 м². Таким образом, для дома площадью 100 м² средняя требуемая тепловая мощность равна 5 кВт.

Чем больше площадь дома, тем выше расход топлива, который также зависит от КПД отопительного прибора. У большинства классических твердотопливных котлов КПД составляет 70–75 %, а у традиционных печей – еще ниже: у русской печи в среднем 65 %, а у стальной – около 55 %.

Теплотворная способность дров также варьируется в зависимости от породы дерева и его влажности. При влажности 50 % берёза даёт 2371 кВт/м³, а при 30 % – уже 2716 кВт/м³ [1].

Тепловой расчет для дома площадью 100 м². Топим расколотой берёзой длиной 50 см, так как в доме установлена кирпичная печь, то КПД данной печки в среднем составляем 65 %.

Отопительный сезон длится с октября по май. В месяц выходит 2,87 м³ дров, и за 8 месяцев получаем необходимый на сезон объём высушенной берёзы, который составляет 23 м³.

В Архангельской области 1 м³ колотой берёзы стоит 2100 рублей, тогда за 8 месяцев выйдет 48 300 рублей, то есть в месяц будет выходить 6 037,5 рублей за отопление.

Для теплового расчёта газа берём среднее утепление стен из минеральной ваты. Котёл в сутки работает 7 часов и его КПД составляет 90 %.

При такой эксплуатации котла расход газа составляет 245,6 м³/мес. [5].

В Архангельской области 1 м³ газа составляет 8,24 рублей. Следовательно, в месяц выходит 2 024,83 рублей и за 8 месяцев выйдет 16 198,64 рублей. Полученное значение без учета электричества, но так как есть газовый котел, подключенный к электричеству, то он употребляет 0,075 кВт·ч. Тогда за месяц он употребляет 15,75 кВт·ч, а за 8 месяцев 126 кВт·ч. Для Архангельской области 7,42 руб./кВт·ч. То есть за месяц выходит 116,9 рублей за использование электричества котлом и за 8 месяцев составит 934,9 рублей, то за 8 месяцев газ потребует 17 133,56 рублей [2].

Для подведения газа к частному дому нужно обратиться в местную газораспределительную организацию [3]. Чтобы заключить соглашение с компанией и получить технические условия, требуется предоставить минимальный пакет документов, а также заказать проект подключения [4].

Заказывать монтажные работы на участке можно в ГРО или частной компании, у которой есть все допуски и разрешения. Работать над подключением газа можно, даже если дом ещё на стадии строительства.

В таблице рассмотрим затраты на газоиспользующие оборудования (ГИО) в

жилой дом площадью 100 м² [5].

Таблица 1. Затраты на основное газоиспользующее оборудование (ГИО)

Оборудование, марка	Стоимость оборудования, руб.	Стоимость установки, руб.
Плита газовая 4-х комфорочная с устройством «газ-контроль» De Luxe 5040.38Г (Щ)	14 890	3 549
Котел двухконтурный АКГВ-11,6-3 Комфорт (<150)	18 112	9 240
Итого:		45 791

Итоговая стоимость только ГИО составляет 45 791 рублей. Далее рассмотрим сопутствующее оборудование.

Таблица 2. Затраты на сопутствующее оборудование и арматуру

Оборудование, марка	Стоимость оборудования, руб.	Стоимость установки, руб.
Прибор учета газа G 6	6 996	1 191
Сигнализатор по метану	4 500	3 475
Сигнализатор по оксиду углерода	5 139	3 475
Электромагнитный клапан	2 331	1 060
Запорная арматура Ду 15	210	1 060
Запорная арматура Ду 20	265	1 060
Запорная арматура Ду 32 - 2 шт.	1 445	1 429
Газовый шланг Ду 15	283	603
Газовый шланг Ду 20	367	603
Изолирующее соединение Ду 32	450	1 175
Итого:		37 117

Стоимость сопутствующего оборудования составляет 37 117 рублей.

Пренебрежение этими элементами, особенно сигнализаторами и запорной арматурой, недопустимо с точки зрения безопасности эксплуатации, что делает данную статью расходов обязательной и не подлежащей произвольному сокращению [6].

Значительную часть расходов составляют работа по проектированию и монтажу сети газопотребления. В рамках догазификации за подведение сети газораспределения до границы земельного участка и осуществления фактического присоединения осуществляется без взимания платы с заявителя.

Таблица 3. Стоимость работ по проектированию

Вид работ / услуги	Средняя стоимость, руб.	Примечания
Разработка проекта газоснабжения дома	15 000	Включает схемы, расчёты, спецификацию оборудования. На цену влияет сложность
Топографическая съёмка участка	11 500	Требуется для привязки трассы газопровода к местности
Ориентировочный итог по проекту	26 500	Итог зависит от региона и состава необходимых работ

После утверждения проекта выполняются работы по прокладке труб и монтажу. Их стоимость наиболее вариабельна и зависит от расстояния, типа грунта и способа прокладки. Для 5 метров подземной прокладки и расстояния внутри дома 10 метров строительно-монтажные работы выйдут 29 633 рублей, для газифицирования жилого дома нам потребуется 135 547 рублей.

На цену влияет множество факторов, такие как:

- удаленность от магистрального газопровода: чем дальше дом от действующей газовой трубы, тем дороже обойдется подключение;
- способ прокладки: подземная прокладка позволяет спрятать трубы и защитить их от внешних воздействий, но обходится дороже из-за земляных работ, но надземный вариант дешевле;
- потребляемая мощность и количество потребителей: чем выше заявленная мощность и количество точек потребления, тем сложнее проект и дороже оборудование.

Экономия при использовании газа составит:

$$48\,300 - 17\,133,56 = 31\,166,56 \text{ руб./год}$$

Эта сумма является чистой экономией каждый отопительный сезон после перехода на газ, общая стоимость подключения и оборудования составляет 162 047 рублей.

Срок окупаемости (СО) – это период, за который накопленная экономия компенсирует первоначальные затраты. Рассчитывается он по простой формуле:

$\text{СО (годы)} = \text{Первоначальные вложения} / \text{Годовая экономия}$

$$\text{СО} = 162\,047 \text{ руб.} / 31\,166,56 \text{ руб./год} \approx 5,2 \text{ года.}$$

Исходя из этого, получаем, что за 5 лет и 3 месяца разница в стоимости отопления газом и дровами полностью покрывает все расходы на проведение газа и покупку нового оборудования [7].

Заключение

Подводя итог, срок окупаемости менее 6 лет является очень хорошим показателем для любого долгосрочного инвестиционного проекта, к которому, безусловно, относится модернизация системы отопления дома. Это означает, что уже на четвертый год эксплуатации домовладелец начинает получать чистую прибыль от своего решения в виде существенно более низких ежегодных счетов за отопление. Таким образом, даже с учётом значительной разовой суммы на газификацию, переход на газовое отопление для постоянного проживания является экономически обоснованным и выгодным решением в среднесрочной перспективе.

Список литературы:

1. Расчет расхода дров на отопление // Сайт «Печкин-52». – URL: <https://pechkin-52.ru/blog/sovety-pokupatelyam/raschyet-raskhoda-drov-na-otoplenie-doma/> (дата обращения: 28.01.2026).
2. Калькулятор расхода газа на отопление // Сайт «Усадьба-шоп». – URL: <https://usadba-shop.ru/blog/kalkulyator-rashoda-gaza-na-otoplenie> (дата обращения: 28.01.2026).
3. Официальный сайт администрации городского округа город Архангельск. – URL: <https://www.arhcity.ru/?page=310/17> (дата обращения: 28.01.2026).

4. Тарифы на электроэнергию в Архангельской области на 2025 год // Электросети России: сайт elec.ru. – URL: <https://www.elec.ru/library/rd/tarify-elektroenergiya-2025/arhangelsk-obl.html> (дата обращения: 28.01.2026).
5. Калькулятор газификации // ConnectGas. – URL: <https://connectgas.ru/calculator> (дата обращения: 28.01.2026).
6. Как провести газ в частный дом и сколько это стоит // Яндекс.Недвижимость. – URL: <https://realty.yandex.ru/journal/post/kak-provesti-gaz-v-chastnyy-dom-i-skolko-eto-stoit/> (дата обращения: 28.01.2026).
7. Федеральная служба государственной статистики // Официальная статистика тарифов и цен на энергоресурсы. – URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/tariffs> (дата обращения: 28.01.2026).

© Бобров Д. А., 2026

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РЕКТИФИКАЦИЕЙ ИЗОБУТАН-ИЗОБУТИЛЕНОВОЙ ФРАКЦИИ

ст. преподаватель **Щетинская Ольга Николаевна**,
Тобольский индустриальный институт (филиал)
Тюменского индустриального университета,
г. Тобольск, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается процесс управления и модель колонны ректификации изобутан-изобутиленовой фракции с учетом динамических входных переменных. Разработанная модель учитывает нелинейность и высокочастотную динамику процесса.

Ключевые слова: автоматическое управление, динамические переменные, нестационарный процесс, математическая модель, ректификационная колонна, алгоритм управления.

IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF A DYNAMIC MODEL FOR CONTROL OF ISOBUTANE-ISOBUTYLENE FRACTION DISTILLATION

Senior Lecturer **Shchetinskaya Olga Nikolaevna**,
The TIU branch in Tobolsk
Tobolsk, Russian Federation

Abstract. This article examines the control process and model of an isobutane-isobutylene fraction distillation column, taking into account dynamic input variables. The developed model accounts for the nonlinearity and high-frequency dynamics of the process.

Keywords: automatic control, dynamic variables, non-stationary process, mathematical model, distillation column, control algorithm.

Процесс ректификации изобутан-изобутиленовой фракции является нестационарным и многопараметрическим. Поэтому основной проблемой, стоящей перед современными газоперерабатывающими предприятиями, занимающимися ректификацией контактно газа, является повышение эффективности работы колонны [1].

В работах [2, 3, 4, 5] рассмотрены основы, виды и особенности процесса ректификации, его тепловой и материальный балансы. Проведем анализ современных методов автоматического регулирования процессом ректификации (рисунок 1).

Рассмотренные модели управления процессом ректификации направлены в первую очередь на снижение энергозатрат, но практически не влияют на увеличение эффективности технологического процесса.

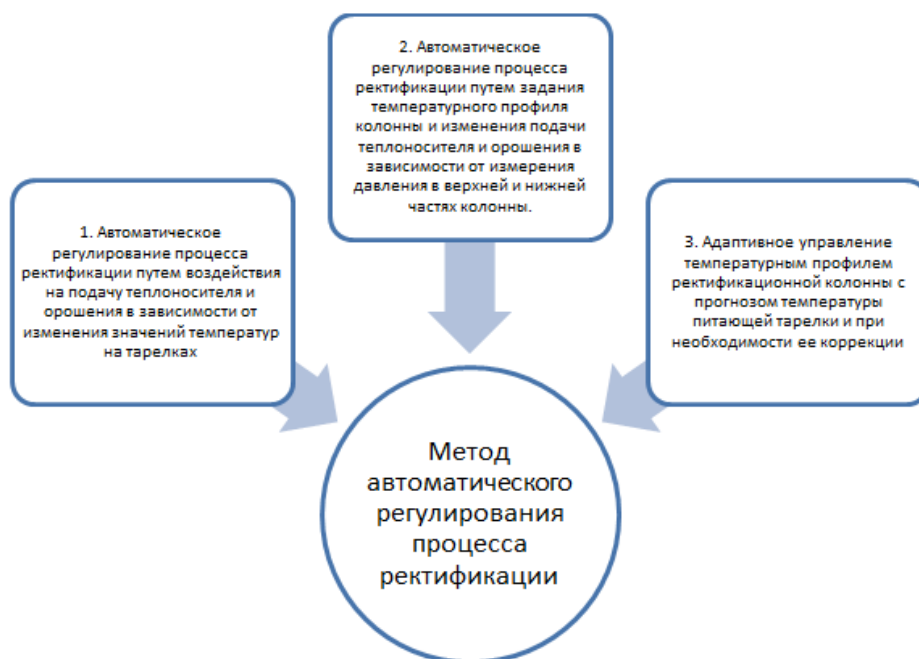


Рисунок 1. Сравнительный анализ систем регулирования процессом ректификации

Согласно анализу приведенных методов, каждый из них обладает определенными недостатками. В первом случае, при управлении технологическим процессом есть мультипликативная связь информационных потоков по параметрам, что ведет к неточности результатов управления. Для второго метода характерным является возникновение погрешностей в зависимости от времени управления и температуры питающей тарелки колонны. Третий метод регулирования ограничивается использованием многокомпонентной ректификации из-за жесткой стабилизации температуры верхней и нижней частей колонны, что технически сложно реализовать.

Одной из основных проблем, стоящих перед современными предприятиями, занимающимися ректификацией, является необходимость модернизации существующих установок таким образом, чтобы обеспечить повышение эффективности и безопасности при минимальных затратах. Часто качество сырья на выходе из ректификационной колонны колеблется в пределах 90–95 %, что указывает на наличие резервов для увеличения выхода целевого продукта и снижения энергетических затрат [1].

Математическая модель, отражающая динамический режим процесса ректификации, может определить особенности протекания реального технологического процесса не полностью. На поведение ректификационной колонны влияют такие неопределённости, как неполнота информации физического процесса внутри колонны или наличие фактора случайности или противодействия. По результатам исследования Мухитдинова Д. Ф., «фактические значения величины таких технологических факторов, как величина орошения колонны и нагрузки на кипятильники по пару чаще всего не соответствуют точным параметрам системы управления процессом» [6].

В качестве входных параметров для управления принимаем динамику изменения температуры на тарелках и состав контактного газа. Тогда задачей математической модели процесса управления нестационарным технологическим процессом является совокупность дифференциальных и алгебраических уравнений.

Основными условиями разработки математической модели технологического процесса определим:

- 1) постоянство удерживающей способности жидкости и пара;
- 2) постоянство давления на тарелках.

Составим математическую модель динамической системы:

1. Уравнение общего материального баланса для динамической модели:

$$\frac{d(M_{U,n} + M_{V,n})}{dt} = U_{n-1} + V_{n+1} + F_n^V + F_n^u - (V_n + V_{s_n}) - (U_n + U_{s_n}), \quad (1)$$

2. Уравнение покомпонентного материального баланса:

$$\begin{aligned} \frac{d(M_{U,n}x_{n,j} + M_{V,n}y_{n,j})}{dt} = & V_{n+1}x_{n+1,j} + U_{n+1}y_{n+1,j} + e_{\text{мл}} \sum_{k=1}^{NF} \frac{P_{fk}}{P_n} F_k x_{fk} + \\ & + (1 - e_{\text{мл}}) \sum_{k=1}^{NF} F_k x_{fk} - (V_n + V_{s_n})x_{n,j} - (U_n + U_{s_n})y_{n,j} \end{aligned} \quad (2)$$

3. Уравнение теплового баланса

$$\frac{d(M_{V,n}h_{V,n})}{dt} = U_{n-1}h_{U,n-1} + V_{n+1}h_{V,n+1} + Q_{fn} + Q_n - (V_n + V_{s_n})h_{V,n} - (U_n + U_{s_n})h_{U,n} \quad (3)$$

4. Энтальпии парового и жидкостного потоков:

$$\begin{aligned} h_{V,n} &= \sum h_{n,j}^V x_{n,j} \\ h_{U,n} &= \sum h_{n,j}^U x_{n,j} \end{aligned} \quad (4)$$

В данной модели:

$M_{U,n}$, (кмоль/с) – удерживающая способность по жидкости на n-ой тарелке;

$M_{V,n}$, (кмоль/с) – удерживающая способность по пару на n-ой тарелке;

F_n^V – поток питания жидкости, поступающий на n-ую тарелку;

F_n^u – поток питания пара, поступающий на n-ую тарелку;

V_{s_n} , (кмоль/с) – отбор потока пара с n-ой тарелки;

U_{s_n} , (кмоль/с) – отбор потока жидкости с n-ой тарелки;

$x_{n,j}$ – мольная доля пара на n-ой тарелке;

$y_{n,j}$ – мольная доля жидкости на n-ой тарелке;

$e_{\text{мл}}$ – доля паровой фазы питания;

P_{fk} (кПа) – давление насыщенных паров чистого компонента;

P_n (кПа) – давление на n-ой тарелке;

x_{fk} – состав жидкой фазы питания.

В основе математической модели лежит классическое уравнение материального и теплового баланса колонны ректификации. Все переменные представленных математических уравнений по общему и покомпонентному материальному балансу характеризуют параметры управления технологическим процессом в стационарном режиме.

Уравнение теплового баланса колонны ректификации отражает динамическую составляющую процесса ректификации. Учет динамических особенностей процесса получения изобутан-изобутиленовой фракции высокой концентрации определяет условия и параметры процесса регулирования ректификационной колонной. Алгоритм автоматического регулирования процесса ректификации должен учитывать нестационарность параметров управления.

Формирование управляющего алгоритма, направленного на повышение качества конечного продукта изобутан-изобутиленовой фракции, с учетом особенностей технологического процесса (нестационарность и динамизация) может быть основан на использовании методов машинного обучения. Большинство применений методов машинного обучения в промышленности относится к предиктивной аналитике (Predictiveanalytics) – 26 %, и описательной аналитике (Descriptiveanalytics) – 23 %.

Анализ предприятий, занимающихся нефтегазопереработкой, определил основные преимущества использования машинного обучения, такие как:

- 1) автоматизация лабораторных исследований качества нефте- и газо-продуктов, основанная на использовании алгоритмов машинного обучения для снижения времени на проведение экспериментов;
- 2) оптимизация технологических процессов для снижения затрат энергоносителей и повышение качества протекания реакций;
- 3) повышение экологической и технологической безопасности с использованием моделирования и минимизации опасных факторов производства;
- 4) анализ износа узлов и механизмов для предупреждения экстремальной эксплуатации оборудования и аварийных режимов работы технологических объектов и установок нефтегазоперерабатывающей отрасли.

Выделяют несколько алгоритмов машинного обучения, таких как линейная и логистическая регрессии, метод опорных векторов, дерево решений и случайный лес, бустинг, метод k-ближайших соседей, нейронные сети и сверточные нейронные сети. Из всех этих алгоритмов наиболее эффективными для процессов нефтегазопереработки можно выбрать несколько, которые способны обучаться на реальных данных производственных процессов, повышая их прогнозируемость и эффективность.

Моделируя процесс ректификации изобутан-изобутиленовой фракции методами параметрической идентификации с использованием алгоритмов машинного обучения, возможно определить параметры оптимизации технологического процесса, направленные на поддержание динамических режимов работы колонны в условиях нестационарного технологического процесса. Изменяя полученные параметры в условиях вычислительного эксперимента, мы получим

оптимальные настройки управления процессом ректификации для повышения эффективности получения конечного продукта.

Список литературы:

1. Щетинская, О. Н. Повышение эффективности процесса ректификации за счет применения методов машинного обучения в системах управления технологическим процессом / О. Н. Щетинская: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР 2025». – Томск, 2025. – С. 153-155.
2. Расчет основных процессов и аппаратов нефтепереработки / Г. Г. Рабинович, П. М. Рябых, П. А. Хохряков и др.; под ред. Е. Н. Судакова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Химия, 1979. – 568 с.
3. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов / А. Г. Касаткин. – 10-е изд., стереотипное, доработанное. – Москва: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.
4. Александров, И. А. Перегонка и ректификация в нефтепереработке / И. А. Александров. – Москва: Химия, 1981. – 352 с.
5. Шаровина, С. О. Адаптивное управление температурным профилем ректификационной колонны тарельчатого типа: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / С. О. Шаровина. – Москва, 2014. – 167 с.
6. Мухитдинов, Д. Ф. Моделирование колонн ректификации в условиях неопределенности / Д. Ф. Мухитдинов, Ё. Б. Кадилов, А. А. Ахматов // Евразийский Союз Ученых. – 2019. – №5. – С. 50 – 53.

© Щетинская О. Н., 2026

ВЫБОР ОПОР НА СПИНКЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО КОМПЕНСАТОРА ТРУБОПРОВОДА

аспирант **Борткевич Олег Александрович**,
доктор техн. наук **Пеленко Валерий Викторович**,
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В настоящее время нормативной документацией вертикальное расположение компенсаторов предусматривает введение понижающих коэффициентов (например, $k = 0,5$), приводящих к увеличению габаритов компенсаторов. При горизонтальном расположении П-образного радиального компенсатора наиболее нагруженными являются отводы компенсатора. Величина расчетных напряжений зависит не только от геометрии трассы и температуры рабочей среды, но и от типа промежуточных опор (скользящие, катковые) и мест их расположения. Благодаря рациональному выбору конфигурации подвесок возможно снижение напряжений в прилегающих к спинке отводах компенсатора, уменьшение габаритов компенсатора.

Ключевые слова: трубопроводы, тепловая сеть, трасса, нагрузка, компенсатор, напряжения, перемещения, опора.

SELECTION OF SUPPORTS ON THE BACK OF THE VERTICAL PIPELINE EXPANSION JOINT

Postgraduate Student **Bortkevich Oleg Aleksandrovich**,
Grand PhD in Engineering **Pelenko Valery Viktorovich**,
St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Currently, the normative documentation of the vertical arrangement of compensators provides for the introduction of reducing coefficients (for example, $k = 0,5$), leading to an increase in the dimensions of the compensators. With the horizontal arrangement of the U-shaped radial compensator, the branches of the compensator are the most loaded. The magnitude of the design stresses depends not only on the geometry of the track and the temperature of the working medium, but also on the type of intermediate supports (sliding, roller) and their locations. Due to the rational choice of the suspension configuration, it is possible to reduce stresses in the expansion joints adjacent to the backrest and reduce the dimensions of the expansion joint.

Keywords: pipelines, heating network, route, load, compensator, stress, displacement, support.

Опорно-подвесная система (ОПС) трубопроводов тепловых электростанций представляет собой сочетание неподвижных опор, жестких опор/подвесок и упругих опор/подвесок. Выбор типа опоры осуществляется в процессе проектирования трубопровода [1]. Жесткие опоры используются повсеместно при расположении трассы трубопровода в горизонтальной плоскости, также отсутствуют вертикальные перемещения трубопровода при прогреве, либо вертикальные перемещения так малы, что могут быть восприняты жесткими опорами. При наличии вертикальных участков трубопровода появляются вертикальные перемещения, которые не всегда возможно компенсировать только жесткими опорами. На величину температурных перемещений оказывает влияние температура рабочей среды [2], температура монтажа, длина вертикального участка трубы, механические свойства материала трубы: модуль упругости и коэффициент линейного расширения – и геометрические свойства сечения: диаметр трубы и толщина стенки.

Рассмотрен участок трубопровода между двумя неподвижными опорами с горизонтальным П-образным радиальным компенсатором (рис. 1) и с вертикально расположенным П-образным радиальным компенсатором (рис. 2). Для вертикального расположения компенсатора проведены три варианта расчетов:

- на спинке компенсатора установлены скользящие опоры;
- на спинке компенсатора установлены пружинные подвески, компенсация весовых нагрузок производится в холодном состоянии;
- на спинке компенсатора установлены пружинные подвески, компенсация весовых нагрузок производится в рабочем состоянии (РС).

Типоразмер трубы $\varnothing 325 \times 8$ мм, материал – 20, масса погонного метра трубы с изоляцией и рабочей средой 197,63 кг, рабочая среда – вода под давлением 2,5 МПа, с температурой 250 °С [3]. Отводы выполнены радиусом 450 мм с коэффициентом овализации 8 %. Расчет произведем согласно требованиям работы [4] п. 5.2, на расчетный ресурс 100 000 часов и 3000 пусков. При таких параметрах рабочей среды и марки стали трубопровод рассчитывается по методике «низкотемпературных» трубопроводов. Условия обеспечения прочности выглядят следующим образом:

$\sigma_{\text{эфф.}} \leq 1,1 [\sigma]$	оценка статической прочности на совместное действие внутреннего давления, весовой нагрузки и усилий промежуточных значений (ЭТАП I полного расчета)
$\frac{1}{2} \sigma_{\text{экв.}} \leq 1,5 [\sigma_a]$	оценка циклической прочности прямолинейных и криволинейных труб низкотемпературных трубопроводов на совместное действие всех нагружающих факторов (ЭТАП III полного расчета)

Допускаемые напряжения принимаются ([4], таблица 2.2.) равными соответствующим значениям в колонке для расчетного ресурса. В нашем случае допускаемые напряжения для оценки циклической прочности не зависят от температуры, зависимость только от числа пусков (для проектируемых трубопроводов число циклов принимается не менее 3000), допускаемое напряжение по первому этапу расчета зависит от температуры и не зависит от времени наработки.

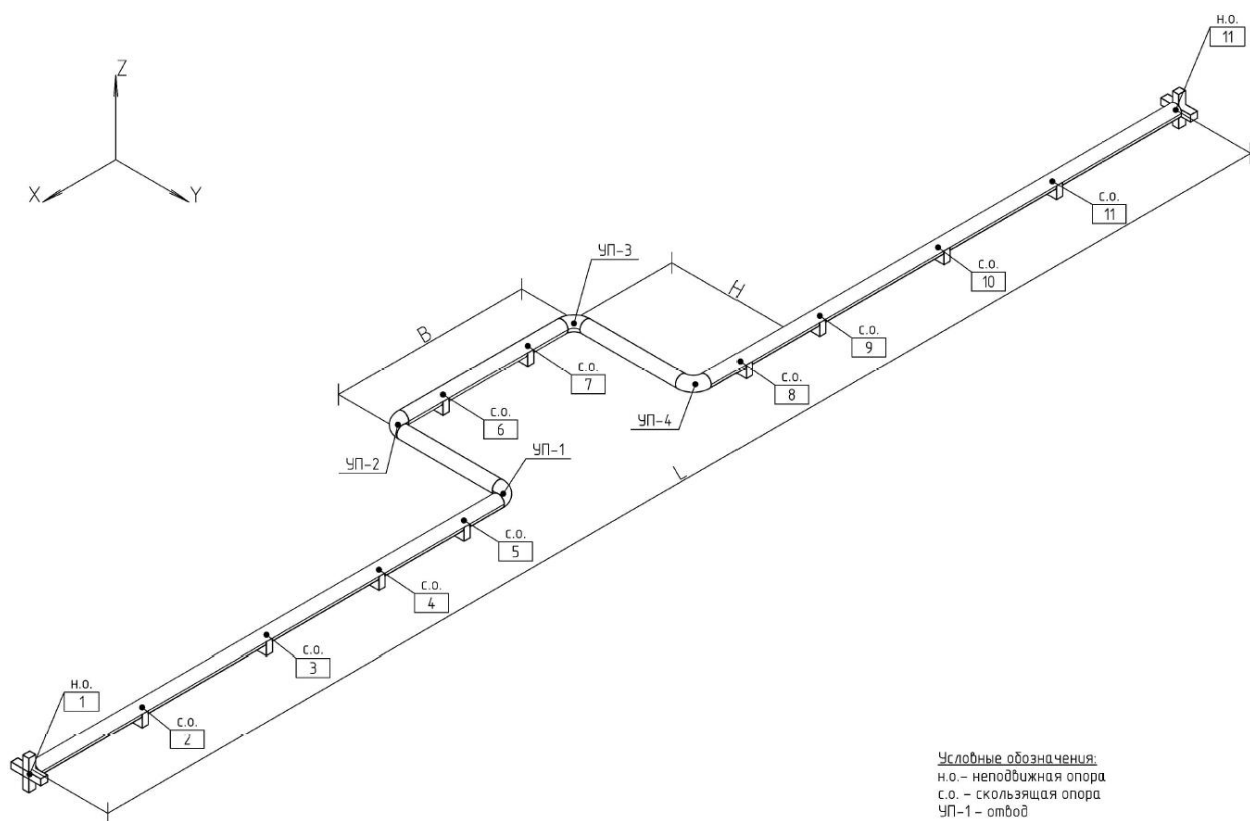


Рисунок 1. Участок трубопровода между двумя неподвижными опорами с горизонтальным П-образным радиальным компенсатором

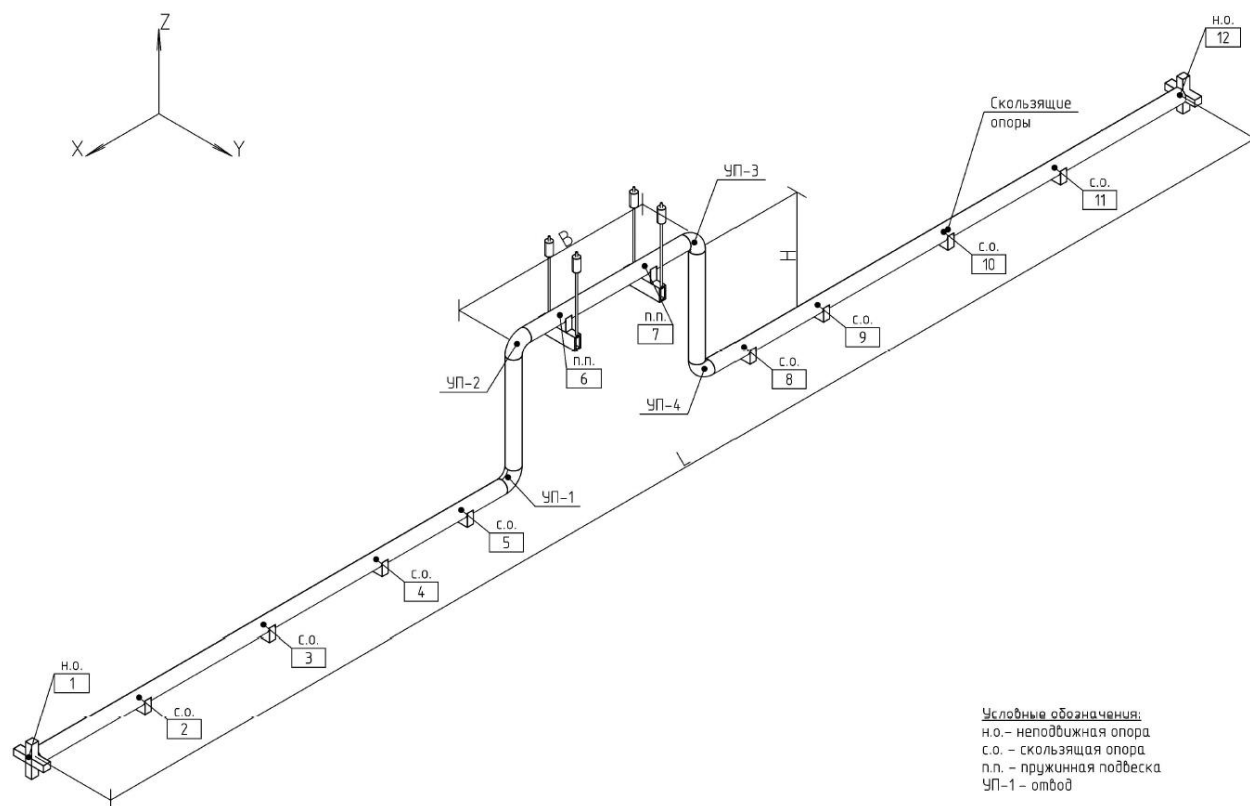


Рисунок 2. Участок трубопровода между двумя неподвижными опорами с вертикальным П-образным радиальным компенсатором

Результаты расчетов вариантов в программе «Старт» приведены на рисунках 3, 4, 5.

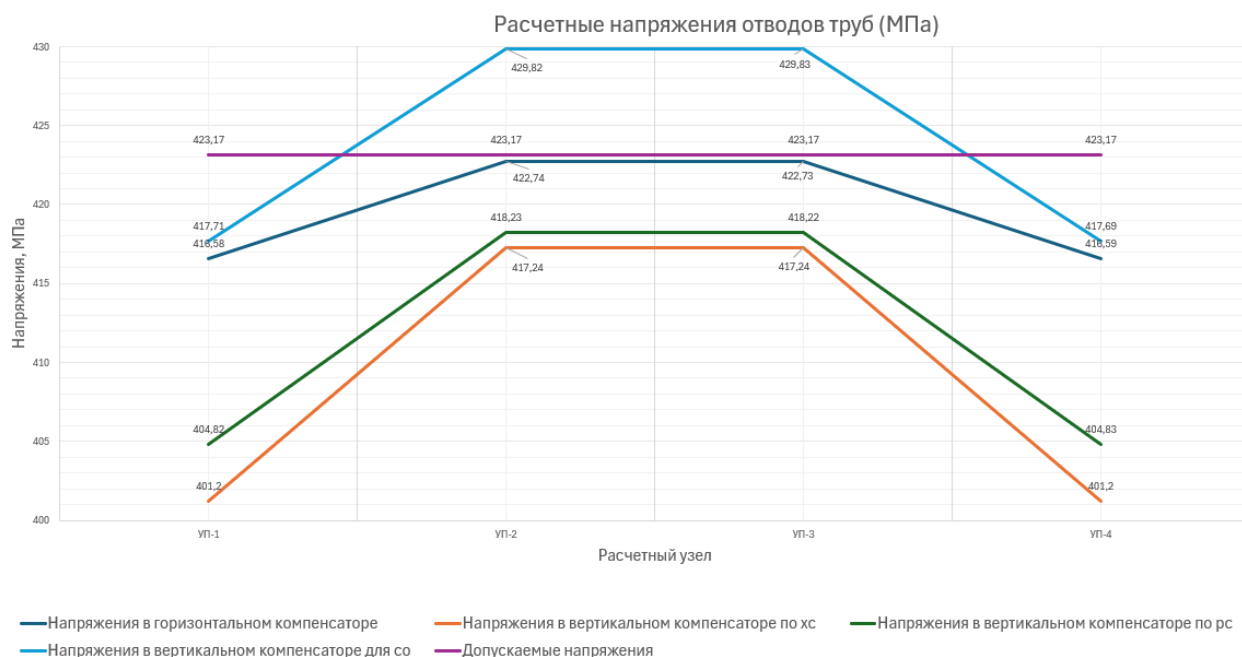


Рисунок 3. График расчетных и допускаемых амплитудных напряжений в отводах трубопровода

Правильность выбора вылета $H=7000$ мм и длины $B=10500$ мм при $L=103000$ мм горизонтального компенсатора можно увидеть на графике 1 – разность между допускаемыми напряжениями и расчетными составляет менее 1 МПа или 0,1 %.

При размещении того же компенсатора в вертикальной плоскости расчетные напряжения в отводах спинки компенсатора превысят нормативные величины на 1,57 %.

Снижение расчетных напряжений в отводах можно добиться путем замены скользящих опор на спинке компенсатора пружинными подвесками [5]. Наибольшего снижения величин расчетных напряжений можно достигнуть путем уравнивания массы трубопровода в холодном состоянии, при этом в рабочем состоянии элементы опорно-подвесной системы не будут сбалансированы. Величина небаланса составит:

$$\Delta P = \frac{P_{p1} - P_{p2}}{P_{p2}} \times 100\% = \frac{591 - 997}{997} \times 100\% = -40\%,$$

где P_{p1} – нагрузка в рабочем состоянии на пружинную подвеску при подборе нагрузок по холодному состоянию (кН);

P_{p2} – нагрузка в рабочем состоянии на пружинную подвеску при подборе нагрузок по рабочему состоянию (кН).

Также следует заметить, что при подборе опор по рабочему состоянию придется выбирать более грузоподъемные пружины, чем при расчете по холодному состоянию, так как при нагревании будет происходить разгрузка пружин за счет перемещения трубопровода вверх, а при остывании, наоборот, пружины будут нагружаться за счет перемещения точки крепления к трубопроводу вниз.

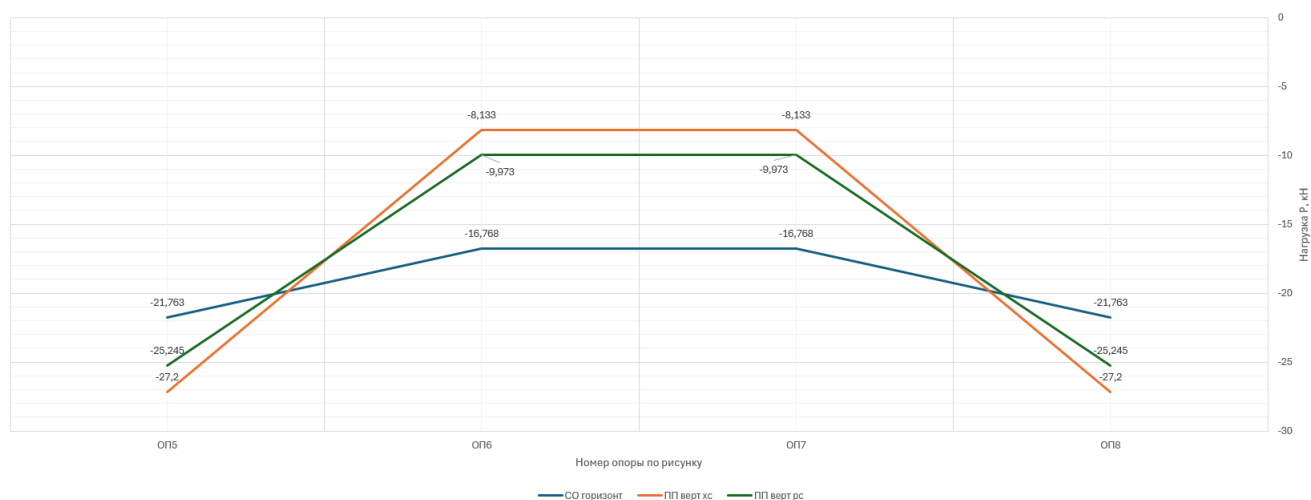


Рисунок 4. График расчетных значений нагрузок на опоры компенсатора в рабочем состоянии



Рисунок 5. График расчетных значений нагрузок на опоры компенсатора в холодном состоянии

Суммарные же нагрузки на ОПС не меняются от типа компенсатора и составляют 243,58 кН как в рабочем, так и в холодном состоянии. То есть опоры не препятствуют вертикальным перемещениям трубопровода с вертикальным размещением компенсатора.

Заключение

Проведенный анализ зависимости типов опор от плоскости размещения П-образного радиального компенсатора показал возможность снижения расчетных и реальных напряжений в отводах за счет замены скользящих опор на спинке вертикальных компенсаторов на пружинные подвески.

Список литературы:

1. Серия 5.903-13 Выпуск 6-95, 7-95, 8-95: Изделия и детали трубопроводов для тепловых сетей.

2. Василевич, Ю. В. Анализ напряженно-деформированного состояния и температурного поля деформируемого растяжением образца / Ю. В. Василевич, А. Е. Мойсейчик, Е. А. Мойсейчик, А. А. Яковлев // Теоретическая и прикладная механика. – 2023. – Вып. 38. – С. 61–71.
3. Магалиф, В. Я. Теоретические основы конструирования трубопроводов. Методическое пособие для пользователей программы СТАРТ. Трубопровод / В. Я. Магалиф. – М., 2017. – С. 50–57.
4. РД 10-249-98 Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды.
5. ГОСТ 55596-2013 Сети тепловые. Нормы и методы расчета на прочность и сейсмические воздействия. Стандартиформ. – М., 2014.

© Борткевич О. А., Пеленко В. В., 2026

ОПТИМИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ВОДОРОДА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ: ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

студент **Гришкевич Михаил Михайлович**,
Иркутский национальный исследовательский технический университет

г. Иркутск, Российская Федерация

студент **Зенкина Дарья Михайловна**,
Омский государственный технический университет

г. Омск, Российская Федерация

науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент

Романов Григорий Радионович,
Иркутский национальный исследовательский технический университет

г. Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. Высокая доля возобновляемых источников требует решений для стабильности и декарбонизации энергосистем. Разработана модель гибридной энергосистемы, сочетающая оптимизацию мощностей, алгоритм MPC и совместный анализ LCOE и LCON. Моделирование подтвердило, что комбинация солнечной и ветровой генерации с сезонным хранением водорода в соляных кавернах снижает вероятность потери нагрузки и повышает экономичность по сравнению с батарейными аналогами. Такие комплексы обеспечивают надёжное безуглеродное энергоснабжение промышленности, ускоряя переход к net-zero.

Ключевые слова: гибридные энергетические системы, зелёный водород, прогнозирующее управление, технико-экономический анализ, сезонное хранение водорода.

OPTIMIZATION OF THE ARCHITECTURE AND OPERATION OF HYBRID SYSTEMS BASED ON RENEWABLE HYDROGEN SOURCES TO IMPROVE POWER SYSTEM STABILITY AND DECARBONIZATION: TECHNO-ECONOMIC JUSTIFICATION

Student **Grishkevich Mikhail Mikhailovich**,
Irkutsk National Research Technical University

Irkutsk, Russian Federation

Student **Zenkina Darya Mikhailovna**,
Omsk State Technical University

Omsk, Russian Federation

Academic Advisor: PhD in Engineering, Associate Professor

Romanov Grigory Radionovich,
Irkutsk National Research Technical University

Irkutsk, Russian Federation

Abstract. High renewable energy penetration demands solutions for grid stability and decarbonization. A hybrid renewable-hydrogen model integrating sizing optimization, MPC, and joint LCOE and LCOH analysis was developed. Simulations demonstrate that coupling solar and wind generation with seasonal hydrogen storage in salt caverns significantly reduces loss of power supply probability and improves cost-efficiency compared to battery-only systems. Such configurations ensure reliable carbon-free industrial power, accelerating the net-zero transition.

Keywords: hybrid energy systems, green hydrogen, predictive management, technical and economic analysis, seasonal hydrogen storage.

Мировая гонка за декарбонизацией включает в себя стремление достигнуть «net-zero» к середине XXI века. Ключевым ориентиром служит Парижское соглашение, которое ставит цель удержать глобальное потепление значительно ниже 2 °C и стремиться к пределу в 1,5 °C. Именно в рамках этих целей развиваются стратегии по достижению нейтральных CO₂ энергосистем и экономики к 2050 году [1].

Параллельно наблюдается бурный рост мощностей солнечной и ветровой генерации, что является крайне положительной тенденцией. Тем не менее, высокая доля прерывистых возобновляемых источников создает следующие вызовы:

- значительные объёмы куртирования энергии, когда избыток ВИЭ просто не может быть использован и принудительно отключается, нанося экономические потери. Например, в Великобритании в 2024 году было утеряно почти 10 % ветровой энергии, а в Северной Ирландии – около 30 %, во Франции и Германии зафиксированы ограничения на солнечную генерацию;

- неопределённость в графиках нагрузки, нестабильность и сложности балансировки сети без масштабного развития инфраструктуры хранения или передачи.

При этом остаются особенно сложные для декарбонизации hard-to-abate-сектора: сталелитейная и цементная промышленность, химия, тяжелый транспорт (авиация, морские перевозки), где прямой переход на электроэнергию маловероятен или технически сложен [2].

Именно здесь на первый план выходит зелёный водород, который предлагает комплексное решение для этих проблем. Он, производимый путём электролиза воды с использованием электроэнергии из ВИЭ, играет несколько ключевых ролей, где прямой переход на электроэнергию маловероятен или технически сложен. Именно здесь на первый план выходит зелёный водород, который предлагает комплексное решение для этих проблем. Он, производимый путём электролиза воды с использованием электроэнергии из ВИЭ, играет несколько ключевых ролей.

Во-первых, он решает задачу сезонного хранения энергии. Водород можно хранить в огромных объёмах, например, в подземных соляных кавернах, и использовать в периоды дефицита, тем самым компенсируя сезонные или длительные промежутки низкой генерации от солнца и ветра.

Кроме того, зелёный водород служит чистым промышленным энергоносителем и сырьём. Он способен замещать углеродоёмкие процессы в таких «труднозефицируемых» отраслях, как DRI-производство стали, цементная и химическая промышленность, а также выступать в качестве экологичного топлива

для транспорта, особенно для тяжёлых грузовиков и средств передвижения с большим диапазоном пробега.

Наконец, водород является центральным элементом концепции связки электроэнергетики и газового сектора, также известной как «power-to-X». Этот подход подразумевает использование избыточной электроэнергии ВИЭ, которая иначе была бы потеряна из-за куртирования, для производства газообразных или жидких энергоносителей, в первую очередь, водорода. Эти продукты затем могут накапливаться, транспортироваться и использоваться в различных секторах. Важно, что существующая газовая инфраструктура потенциально может быть адаптирована для работы на водороде, что значительно снижает необходимые капитальные затраты и ускоряет энергетический переход.

Цель исследования заключается в разработке целостной модели гибридной системы ВИЭ + H₂ для индустриального кластера. Новизна:

- интеграция модели оптимального размера с продвинутым алгоритмом прогнозирующего управления (Model Predictive Control – MPC);
- совместный анализ LCOE и LCOH для оценки стоимости как электроэнергии, так и конечного продукта – водорода;
- анализ чувствительности к климатическим условиям и ценам на оборудование.

Предлагаемая гибридная система объединяет солнечную и ветровую генерацию, модуль электрохимического преобразования энергии (электролиз), многоуровневое хранение водорода и обратную конверсию в электроэнергию для покрытия пиков и/или обеспечения резервирования (рисунок 1). Солнечная электростанция (СЭС) преобразует солнечную радиацию в электричество с помощью фотоэлектрических панелей. В свою очередь, ветровая электростанция (ВЭС) использует кинетическую энергию ветра для генерации электроэнергии через ветровые турбины.

Электролизер (ALK или PEM) необходим для разложения воды на кислород и водород с использованием избыточной электроэнергии от ВИЭ. PEM-электролизеры обладают высокой динамичностью, что делает их подходящими для работы с переменными ВИЭ, в то время как ALK-электролизеры отличаются более низкой стоимостью и длительным сроком службы [3].

После электролиза водород поступает в буферное хранение, где происходит его компримирование для краткосрочного хранения (например, это могут быть баллоны высокого давления). А для долгосрочного хранения используются подземные солевые каверны или металл-гидридные системы. Солевые каверны демонстрируют высокую герметичность, низкие потери и экономическую эффективность для больших объемов водорода [4].

При необходимости топливный элемент или водородная турбина преобразует химическую энергию водорода обратно в электроэнергию. Топливные элементы обладают высоким КПД, в то время как турбины подходят для крупномасштабной генерации. Далее энергия может подаваться в сеть или использоваться непосредственно промышленными установкам.

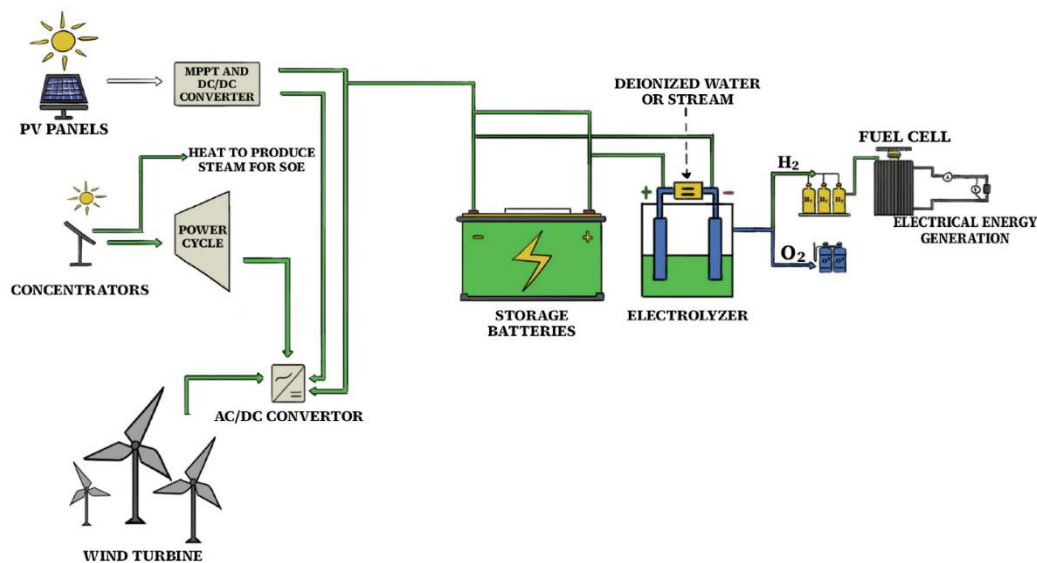


Рисунок 1. Архитектура гибридной системы

Модель СЭС. Выходная мощность СЭС (P_{PV}) рассчитывается как функция от солнечной радиации (G) температуры (T), площади панелей (A) и КПД (η_{PV}):

$$P_{PV} = G \cdot A \cdot \eta_{PV} \cdot (1 - \beta \cdot (T - T_{std})), \quad (1)$$

где β – температурный коэффициент;

T_{std} – стандартная температура [5].

Модель ВЭС. Выходная мощность ВЭС (P_{WT}) зависит от скорости ветра (v), мощности турбины (P_{rated}) и её характеристики (кривая мощности):

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & v < v_{cut-in} \\ P_{rated} \cdot \left(\frac{v - v_{cut-in}}{v_{rated} - v_{cut-in}} \right)^3 & v_{cut-in} \leq v < v_{rated} \\ P_{rated} & v_{rated} \leq v < v_{cut-off} \\ 0 & v \geq v_{cut-off} \end{cases}$$

$v < v_{cut-in}$

$v_{cut-in} \leq v < v_{rated}$

$v_{rated} \leq v < v_{cut-off}$

$v \geq v_{cut-off}$

где v_{cut-in} , v_{rated} , $v_{cut-off}$ – соответственно cut-in, номинальная и cut-off скорости ветра

Модель Электролизера. Производство водорода (Q_{H_2}) пропорционально потребляемой мощности (P_{el}) и КПД электролизера (η_{el}):

$$Q_{H_2} = \eta_{el} \cdot \frac{P}{LHV_{H_2}}, \quad (2)$$

где LHV_{H_2} – низшая теплота сгорания водорода. Учитывается деградация при частичной нагрузке: КПД снижается при нагрузке ниже 20-30 % от номинальной мощности [3].

Модель хранения. Динамический баланс массы водорода в хранилище описывается уравнением:

$$\frac{dM_{H_2}}{dt} = Q_{in} - Q_{out} - Q_{loss}, \quad (3)$$

где Q_{in} и Q_{out} – потоки водорода на входе и выходе;

Q_{loss} – потери (например, due to leakage). Затраты энергии на компримирование составляют примерно 2-4 кВт·ч/кг H_2 при сжатии до 700 бар [4].

Модель топливного элемента. КПД топливного элемента (η_{FC}) определяется как отношение выходной электроэнергии к энергии, содержащейся в водороде:

$$\eta_{FC} = \frac{P_{out}}{Q_{H_2} \cdot LHV_{H_2}} \quad (5)$$

Типичный КПД составляет 40-60 % для низкотемпературных топливных элементов [5].

Минимизация совокупной стоимости владения (Total Cost of Ownership - TCO), которая включает капитальные (CAPEX) и операционные (OPEX) расходы, или минимизация комбинированной стоимости энергии и водорода (LCOE + LCON).

$$\text{Minimize } TCO = CAPEX + \sum_{t=1}^T \frac{OPEX_t}{(1+r)^t}, \quad (6)$$

где r – ставка дисконтирования;

T – срок жизни системы.

Ограничения:

Баланс мощности:

$$P_{PV}(t) + P_{WT}(t) + P_{FC}(t) = P_{load}(t) + P_{el}(t) + P_{curt}(t), \quad (7)$$

где $P_{curt}(t)$ – куртирование избыточной энергии.

Баланс массы водорода:

$$M_{H_2}(t) = M_{H_2}(t-1) + Q_{prod}(t) - Q_{user}(t) - Q_{loss}(t) \quad (8)$$

Ограничения на мощность компонентов:

$$\begin{aligned} P_{tl}^{min} &\leq P_{el}(t) \leq P_{tl}^{max} \\ 0 &\leq M_{H_2}(t) \leq M_{H_2}^{max} \end{aligned} \quad (9)$$

Требование к надежности: Loss of Power Supply Probability (LPSP) < 0,1% [3].

Переменные оптимизации

- мощность СЭС (кВт);
- мощность ВЭС (кВт);
- мощность электролизера (кВт);
- ёмкость хранилища H_2 (кг).

Управление реализовано иерархически. На «медленном» уровне решается планирование (описано выше). На «быстром» уровне – Model Predictive Control (MPC), использующий скользящий горизонт прогнозов генерации/спроса (24-72 ч) и оптимизирующий потоки: прямая подача ВИЭ нагрузке, питание электролизёра, зарядка/разрядка H_2 -хранилищ, экспорт/импорт в сеть, а также запуск реэлектрификации. MPC формулируется как ограниченная оптимизация с учетом нелинейностей оборудования и прогнозной неопределённости; для электролизёров учитываются термодинамика, предельные ramпы и деградационные штрафы (например, за частые старт-стоп и глубокие циклы). Актуальные исследования и отчёты показывают, что MPC эффективно подавляет температурные/динамические «перерегулирования» в ALK-системах и улучшает экономику Power-to- H_2 при ВИЭ-питании, особенно при явном учёте износа [6].

Правила приоритизации потоков задаются политикой:

1. Максимизировать непосредственное потребление ВИЭ нагрузкой (минимизация потерь/дисконтирования по КПД цепочки).

2. Направлять избыток на электролиз и пополнение буфера/сезонного хранилища в пределах допустимых рамп и тепловых ограничений, только затем допускать куртэйлмент; при дефиците – задействовать реэлектрификацию (топливный элемент/турбина) и/или импорт из сети с учётом цен/углеродного следа и требований по LPSR.

Внутри MPC это реализуется через взвешенную функцию стоимости, в которую входят: цена/углерод для сетевых обменов, удельная стоимость деградации электролизёра (зависящая от амплитуды/частоты циклов), энергозатраты на компрессию, а также штрафы за недообеспечение нагрузки. Эмпирические коэффициенты и допустимые рамп берутся из руководств производителя (динамическая работа РЕМ лучше поддерживается коммерческими системами) и отраслевых обзоров по деградации при переменной мощности [6].

Наконец, для корректной экономической оценки комбинированного продукта мы вычисляем LCOE (по IRENA/Lazard) и LCOH (по DOE H2A), причём последний включает капитальные и эксплуатационные издержки электролизёра, компрессии/хранения/доставки и, при необходимости, реэлектрификации. Такой «двухконтурный» KPI-подход позволяет согласованно сравнивать сценарии «электричество сейчас» против «водород на склад/в процесс» [7].

Для сопоставимости конфигураций применяется стандартный подход уровня жизненного цикла: все денежные потоки дисконтируются с учётом ставки дисконтирования (r), период t – годовые интервалы.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{CAPEX_t + OPEX_t + Replacement_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{E_{gen_t}}{(1+r)^t}}, \quad (10)$$

где $CAPEX_t$ – капитальные инвестиции (включая первоначальные и крупные замены)

$OPEX_t$ – операционные и обслуживающие расходы;

$Replacement_t$ – затраты на замены компонентов в течение горизонта;

E_{gen_t} – выработка электроэнергии в году t .

Подходы NREL/DOE и инструменты SAM рекомендуют учитывать фиксированный тариф/дисконтирование и, при продвинутом анализе, реструктурировать CAPEX/OPEX по типам [8].

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{CAPEX_{H_2t} + OPEX_{H_2t} + Cost_{elec_electrolysis_t}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{H_{2_prod_t}}{(1+r)^t}} \quad (11)$$

где в числителе аккумулируются все расходы, относящиеся к водородной части: CAPEX на электролизёры, компрессоры, системы хранения и подготовку; операционные расходы; стоимость электричества, иные переменные затраты (вода, очистка), в знаменателе – суммарный объём произведённого H_2 .

При реализации модели «стоимость электроэнергии для электролиза» может подставляться либо внутреннее LCOE (если электролиз снабжается преимущественно собственной ВИЭ), либо внешняя рыночная цена электроэнергии – выбор влияет на чувствительность результата [9].

Входные данные для анализа:

1. Технические параметры:

- КПД компонентов (КПД электролизёра в зависимости от нагрузки; эффективность топливного элемента/ H_2 -турбины при разных режимах);
- границы динамики (минимальная мощность, скорость роста/падения, частые циклы включений);
- срок службы и режимы замены (инверторы ~10-15 лет, электролизёры технологически зависят от типа; батареи – 10-15 лет; каверны UHS – десятилетия) [10].

2. Экономические параметры:

- удельные CAPEX: руб./кВт для PV и ветра, руб./кВт для электролизёра, руб./кВтч для батарей и руб./кг для инфраструктуры H_2 (компрессия/хранение);
- операционные расходы: фиксированные и переменные (зависимые от часов работы или производимого H_2);
- стоимость капитала: WACC или ставка дисконтирования (r). В зависимости от профиля инвестора и субсидий WACC может сильно варьироваться и существенно влиять на LCON.

3. Климатические данные. Годовые часовые ряды инсоляции и скорости ветра для выбранных локаций (рекомендуется минимум 10-летние или типичные метеорологические годы – ТМУ), чтобы адекватно отразить сезонность и вариации. В работе предусмотрено использование 3-4 типовых локаций (например, солнечный Мадрид, ветреный Север Шотландии, умеренный Средний Запад США) для сопоставления.

В качестве иллюстрации методики рассматривается изолированный индустриальный кластер – металлургическое или нефтеперерабатывающее предприятие с выраженным базовым электрическим спросом и отдельной высокотемпературной тепловой нагрузкой, потенциально покрываемой сжиганием водорода. Кластер характеризуется:

- базовой электрической нагрузкой (круглосуточно) с суточными колебаниями;
- переменной тепловой нагрузкой (производственные печи, сушильные агрегаты), требующая высокотемпературного топлива – H_2 , может служить заменителем природного газа/мазута.

Для модели заданы почасовые профили нагрузки на год; операционная стратегия позволяет направлять часть выработки ВИЭ на электролиз (производство H_2), хранение избытка и обратный отбор H_2 на покрытие тепловой и части электрической потребности в периоды дефицита.

Оптимизация мощностей по целевой функции «минимизация дисконтированного совокупного LCOE + LCON при ограничении LPSP и сетевых лимитов» показывает следующую структуру:

- сочетание PV и ветра – диверсификация повышает надёжность: ветер часто компенсирует ночные/зимние периоды слабой инсоляции; PV обеспечивает высокий суточный ресурс летом;
- электролизёр размером, позволяющим поглощать пик-избыток ВИЭ – экономически оправданно уменьшать электролизёр, чтобы повысить коэффициент использования;

- сезонное хранилище (каверна или плотное геохранилище) для крупномасштабного хранения H_2 и батарея для сглаживания краткосрочных колебаний.

Диверсификация источников снижает корреляцию дефицитов, повышает коэффициент использования электролизёра (меньше простаиваний), а наличие сезонного хранилища позволяет переносить энергию с весенне-летних избытков на осенне-зимний период повышенного спроса.

Анализ по часовым временным рядам (примерно одна неделя летом и одна неделя зимой) демонстрирует:

- летом при высоком PV-вкладе избыток генерации направляется в электролиз → уровень хранилища H_2 растёт; в пиковые ночные часы и при уменьшении солнечной генерации система использует часть H_2 в топливном элементе/турбине для покрытия нагрузки;

- зимой при низкой инсоляции и (в зависимости от региона) большей роли ветра, отбор из сезонного хранилища обеспечивает покрытие тепловой нагрузки и поддерживает базовую электрическую нагрузку, снижая потребление дорогой покупки электроэнергии на рынке.

Эти временные ряды служат для оценки LPSP (Loss of Power Supply Probability/Loss of Load Probability) – вероятности или доли времени, когда система не в состоянии покрыть требуемый спрос. Установка сезонного хранилища и компрессорной системы значительно снижает LPSP по сравнению с вариантом «только батареи + PV». Интеграция H_2 -хранения особенно эффективна для мульти-месячных дефицитов, недостижимых для батарей по экономике.

В регионах с дешёвой и стабильной ВИЭ (высокая инсоляция или устойчивая ветровая ресурсность) LCON снижается главным образом за счёт низкой стоимости энергии для электролиза. Высокое долевое PV даёт низкие дневные издержки H_2 , но требует больших сезонных хранилищ для покрытия ночных/зимних периодов; ветровая генерация, будучи более ночной/сезонно комплементарной, уменьшает потребность в объёмах сезонного хранения, повышая надёжность при прочих равных.

Проведенное исследование демонстрирует, что гибридные системы, интегрирующие возобновляемую энергетику и «зеленый» водород, представляют собой технологически и экономически обоснованное решение ключевых проблем современной энергетики: декарбонизации и обеспечения стабильности энергосистем с высокой долей переменных ВИЭ. Разработанная целостная модель, объединяющая оптимизацию мощностей (sizing) с продвинутым алгоритмом прогнозирующего управления (MPC), позволяет эффективно согласовать производство, потребление, хранение и преобразование энергии в рамках индустриального кластера.

Ключевым выводом работы является синергетический эффект от диверсификации источников генерации (солнечной и ветровой) и внедрения многоуровневой системы хранения водорода. Такая архитектура не только минимизирует куртаилент избыточной энергии, направляя ее на производство водорода, но и обеспечивает надежное энергоснабжение за счет сезонного переноса

энергии. Моделирование подтвердило, что сезонные хранилища водорода, такие как подземные соляные каверны, кардинально повышают надежность системы, снижая вероятность дефицита мощности (LPSP) в периоды низкой генерации от ВИЭ, что экономически недостижимо при использовании только электрохимических батарей.

Технико-экономический анализ на основе комбинированных метрик LCOE и LCON показал, что оптимальная конфигурация системы предполагает выбор мощностей электролиза, ориентированный на поглощение пиковых излишков ВИЭ, что повышает его коэффициент использования и снижает удельную стоимость водорода. При этом региональные климатические условия оказывают существенное влияние на структуру системы: в солнечных регионах растет роль сезонных накопителей, а в ветреных повышается надежность снабжения при меньших объемах хранения.

Таким образом, предложенный подход предлагает комплексный путь для декарбонизации «трудноуловимых» секторов промышленности и тяжелого транспорта, трансформируя проблему изменчивости ВИЭ в возможность производства безуглеродного энергоносителя. Дальнейшее снижение капитальных затрат на оборудование для электролиза и хранения водорода, а также адаптация регуляторной политики будут способствовать ускоренному внедрению таких гибридных систем, делая цель достижения «net-zero» к 2050 году практически реализуемой.

Список литературы:

1. New Energy and Climate Scenario Shows a Path to Stay on Track for Paris Agreement Goals [Электронный ресурс]: – Режим доступа: https://about.bnef.com/insights/finance/new-energy-and-climate-scenario-shows-a-path-to-stay-on-track-for-paris-agreement-goals/?utm_source=chatgpt.com/ (дата обращения: 25.08.2025).
2. Франко А., Рокка М. Интеграция возобновляемых источников энергии и «зеленого» водорода для декарбонизации «трудно поддающихся декарбонизации» промышленных секторов // *Electricity*. – 2024. – № 5(3). – С. 471-490.
3. Bernhard Thaler, Stefan Posch, Andreas Wimmer, Gerhard Pirker, Hybrid model predictive control of renewable microgrids and seasonal hydrogen storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 48, Issue 97, 2023, Pages 38125-38142.
4. Bennet Nii Tackie-Otoo, Md Bashirul Haq, A comprehensive review on geo-storage of H₂ in salt caverns: Prospect and research advances, *Fuel*, Volume 356, 2024.
5. Lanyu Li, Xiaonan Wang, Design and operation of hybrid renewable energy systems: current status and future perspectives, *Current Opinion in Chemical Engineering*, Volume 31, 2021.
6. V. A. Martinez Lopez, H. Ziar, J.W. Haverkort, M. Zeman, O. Isabella. Dynamic operation of water electrolyzers: A review for applications in photovoltaic systems integration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 182, 2023.
7. Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (IRENA), 2024. Затраты на производство возобновляемой энергии в 2023 году. – URL:

https://policycommons.net/artifacts/16633582/renewable-power-generation-costs-in-2023-wwwirenaorg/17518435/?utm_source=chatgpt.com/ (дата обращения: 05.09.2025).

8. LCOE Calculator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sam.nrel.gov/financial-models/lcoe-calculator.html/> (дата обращения: 20.09.2025).

9. DOE H2A Analysis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.hydrogen.energy.gov/program-areas/systems-analysis/h2a-analysis?utm_source=chatgpt.com/ (дата обращения: 15.09.2025).

10. Green Hydrogen Cost and reduction potential – URL: https://greenskillsforhydrogen.eu/wp-content/uploads/2024/07/2024-Juni-4-V03-Masterclass-WHB_-Greenskill4h2_Green-Hydrogen-Cost-and-reduction.pdf (дата обращения: 20.09.2025).

© Гришкевич М. М., Зенкина Д. М., 2026

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КЛЮЧЕВЫЕ ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ АТОМНО-ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

студент **Гиматдинов Ильнас Расимович**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматриваются стратегические и технологические аспекты развития атомно-водородной энергетики в Российской Федерации. Анализируется роль высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов как ключевого звена в производстве водорода. Обосновывается преимущества интеграции ядерных мощностей в химические циклы для обеспечения декарбонизации промышленности и достижения технологического лидерства России на мировом энергетическом рынке в условиях глобального перехода.

Ключевые слова: атомно-водородная энергетика, Росатом, высокотемпературный газоохлаждаемый реактор, ВТГР, микротвэлы, электролиз, паровая конверсия метана, энергетический переход, АЭТС.

TECHNOLOGICAL KEY FACTORS FOR THE DEVELOPMENT OF ATOMIC-HYDROGEN ENERGY IN THE RUSSIAN FEDERATION

Student **Gimatdinov Inas Rasimovich**,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. This paper examines the strategic and technological aspects of nuclear-hydrogen energy development in the Russian Federation. It analyzes the role of high-temperature gas-cooled reactors as a key element in hydrogen production. It substantiates the advantages of integrating nuclear power into chemical cycles to ensure industrial decarbonization and Russia's technological leadership in the global energy market amidst the transition.

Keywords: nuclear-hydrogen energy, Rosatom, high-temperature gas-cooled reactor, HTGR, TRISO fuel, electrolysis, steam methane reforming, energy transition, AHPS.

Развитие атомно-водородной энергетики в Российской Федерации сегодня представляет собой не просто техническую задачу, а масштабный и многогранный национальный проект. Он объединяет в себе сложнейшие достижения фундаментальной ядерной физики, прикладной химии и самого современного материаловедения. В нынешних условиях глобального энергетического перехода, когда требования международных климатических соглашений диктуют новые правила, необходимость глубокой декарбонизации промышленности превращается из экологической инициативы в жесткое условие выживания экономики. Россия обладает уникальным преимуществом: сочетание развитого атомного

энергопромышленного комплекса и колоссальных запасов природного газа создает идеальную базу для формирования новой отрасли.

Глобальный контекст и стратегическое планирование развития отрасли

Современная мировая энергетическая парадигма претерпевает фундаментальные изменения, характеризующиеся постепенным вытеснением ископаемого топлива экологически чистыми решениями. В этой новой системе координат водород рассматривается как идеальный энергоноситель будущего. Он способен обеспечить высокую энергетическую плотность, сопоставимую с традиционными углеводородами, но при этом при его использовании выделяется только чистая вода. Для России такой глобальный тренд несет как серьезные риски снижения спроса на традиционное сырье, так и беспрецедентные возможности для технологического рывка. Развитие атомно-водородных технологий позволяет государству эффективно диверсифицировать экспорт, предлагая мировому рынку «желтый» и «оранжевый» водород. Эти виды топлива, произведенные с помощью атомной энергии, обладают крайне низкой себестоимостью и высокой экологической чистотой, что делает их привлекательными для промышленных гигантов Европы и Азиатско-Тихоокеанского региона.

Государственная стратегия в этой области четко структурирована и закреплена в «Плане мероприятий по развитию водородной энергетики в РФ до 2024 года» и последующих программных документах [1]. Основная цель заключается в создании мощной, ориентированной на внешние рынки отрасли, которая будет полностью опираться на отечественные научные разработки и производственные мощности. Главным локомотивом процесса выступает Государственная корпорация «Росатом», которая интегрировала водородную тематику в ядро своего долгосрочного развития. Стратегия «Росатома» подразумевает не только модернизацию существующих атомных электростанций для производства водорода методом электролиза, но и проектирование принципиально новых атомных энерготехнологических станций. Эти станции будут работать в прямой связке с химическими производствами, превращая ядерную энергию в востребованный промышленный продукт без промежуточных потерь, что ставит Россию в авангард мирового технологического процесса.

Концептуальные основы атомно-водородной энергетики

Ядерная энергетика является уникальным донором для водородного производства, предоставляя сразу два критически важных ресурса: бесперебойную дешевую электроэнергию и колоссальный объем высокопотенциального тепла. Современная концепция развития этой отрасли в России опирается на два основных технологических сценария, которые дополняют друг друга. Первый сценарий ориентирован на крупнотоннажное производство и предполагает использование атомных энерготехнологических станций для высокотемпературной паровой конверсии или пиролиза метана. В этом случае ядерный реактор заменяет собой традиционные печи сжигания газа, обеспечивая химическую реакцию необходимым теплом. Второй сценарий носит более локальный характер и заключается в электролизе воды на действующих блоках АЭС [2]. Этот метод позволяет эффективно использовать избыточную электроэнергию в ночные часы и периоды низкого спроса, стабилизируя нагрузку на единую энергосистему страны и превращая лишние мегаватты в ценный химический ресурс.

Если детально рассматривать параметры этих методов, то электролиз на базе существующих АЭС выигрывает за счет возможности быстрого развертывания модульных установок и получения максимально чистого водорода с нулевым углеродным следом. В то же время паровая конверсия на базе перспективных АЭС ориентирована на промышленные объемы, где в качестве сырья выступает природный газ и вода, а основным продуктом является водород в сочетании с углекислым газом, который планируется улавливать и утилизировать. Главное преимущество интеграции атома в химические процессы заключается в том, что стоимость конечного продукта перестает напрямую зависеть от колебаний цен на ископаемое топливо. При использовании ядерного тепла для конверсии метана экономится от 30 до 40 % природного газа, который в обычных условиях просто сжигается для нагрева системы. Таким образом, газ используется только как сырье, а не как топливо, что радикально повышает эффективность использования природных ресурсов и резко снижает удельные выбросы парниковых газов в атмосферу.

Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы: технологическое ядро системы

Успех всей программы атомно-водородной энергетики напрямую зависит от прогресса в области разработки высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов. Это направление является венцом инженерной мысли в атомной сфере, так как стандартные водо-водяные реакторы, составляющие основу современной генерации, работают при температурах около 300-330 °С. Такого температурного потенциала недостаточно для запуска эффективных химических реакций разделения метана или воды. Реакторы типа ВТГР используют принципиально иной подход [3]. В качестве теплоносителя здесь применяется инертный газ гелий, который не вступает в реакции и способен переносить огромную тепловую энергию, а замедлителем служит графит, обладающий высокой термостойкостью. Такая конфигурация позволяет получать на выходе из активной зоны температуру в диапазоне 750-950 °С, что открывает двери для прямой интеграции атомного реактора в сложные нефтехимические и металлургические циклы.

Разработкой этих сложнейших машин в России занимается АО «ОКБМ Африкантов», где создается проект модульной АЭС. Архитектура станции предполагает наличие четырех независимых реакторных блоков, что обеспечивает беспрецедентную надежность и гибкость производства. Если один из модулей требует планового ремонта или перезагрузки топлива, остальные три продолжают снабжать химический цех энергией, не прерывая технологический цикл. Технические характеристики одного модуля ВТГР впечатляют: при тепловой мощности около 600 МВт он способен обеспечить производство до 110 000 тонн водорода в год. Особое внимание инженеры уделяют чистоте продукта: использование промежуточных теплообменников позволяет физически изолировать радиоактивный контур реактора от химических сред. Запуск первого промышленного образца такой станции запланирован на период 2033-2036 годов, что станет точкой отсчета для формирования сети атомно-водородных кластеров, способных снабжать энергией целые регионы.

Инновационные топливные циклы и материаловедение

Функционирование реакторов при температурах, близких к тысяче градусов Цельсия, выдвигает запредельные требования к ядерному топливу. Обычные тепловыделяющие элементы в циркониевых оболочках, привычные для современной энергетики, просто расплавятся в таких условиях. Именно поэтому в АО «ВНИИНМ им. Бочвара» ведутся интенсивные разработки микротвэлов – топливных частиц нового поколения, построенных по принципу многослойной брони [4]. Каждая такая частица, известная как TRISO-топливо, представляет собой крошечную сферу диаметром меньше миллиметра. В самом сердце находится ядро из диоксида урана, защищенное несколькими барьерами. Первый слой из пористого пироуглерода служит своего рода амортизатором, принимая на себя давление газообразных продуктов деления. Последующие слои плотного пироуглерода и сверхпрочного карбида кремния создают герметичную капсулу, удерживающую радиацию внутри даже при нагреве свыше 1600°C.

Применение такой топливной композиции позволяет реализовать концепцию внутренне присущей безопасности ядерной установки. Это означает, что физические свойства материалов сами по себе предотвращают возможность серьезной аварии: расплавление активной зоны становится практически невозможным из-за термической стойкости микротвэлов. Благодаря этому АЭТС можно проектировать и строить в непосредственной близости от крупных промышленных потребителей водорода и населенных пунктов. Такое территориальное сближение радикально сокращает расходы на логистику и строительство дорогостоящих трубопроводных систем. Поэтому прогресс в материаловедении и создание уникальных керамических покрытий для топлива становятся тем самым фундаментом, на котором строится безопасность и экономическая целесообразность всей водородной стратегии страны.

Процессы высокотемпературной переработки сырья и оптимизация систем

Основным технологическим процессом на базе АЭТС является паровая конверсия метана. Эта реакция требует подвода колоссального количества энергии извне – около 206 кДж на каждый моль вещества. В традиционной промышленности для этого сжигают часть дорогостоящего газа, что ведет к выбросам углекислого газа и снижению КПД. В российской модели развития атомно-водородного сектора это тепло поставляется напрямую от ВТГР. Эффективность передачи энергии критически зависит от выбранной тепловой схемы. Инженеры рассматривают как двухконтурные варианты с максимальным КПД, так и более безопасные схемы с промежуточным гелиевым контуром. Последние, хотя и ведут к некоторой потере температуры, обеспечивают гарантированную радиационную безопасность химического производства. Чтобы компенсировать эти потери, ведется работа над повышением температуры гелия на выходе из реактора до 850-900 °C, что позволяет достигать почти стопроцентной степени превращения метана в водород.

Параллельно с газовыми технологиями «Росатом» активно продвигает направление высокотемпературного твердооксидного электролиза. Эта технология считается наиболее перспективной для интеграции с атомными блоками, так как она потребляет не только электричество, но и перегретый пар. При работе в

высокотемпературном режиме энергия связей в молекуле воды ослабевает, что позволяет тратить гораздо меньше электричества на её разрыв. КПД таких установок достигает внушительных 80-90 %, что значительно превосходит показатели классических щелочных электролизеров. Уже в ближайшие годы на Кольской АЭС будет запущен первый в стране опытный комплекс, где ученые и инженеры отработают промышленные режимы получения сверхчистого водорода. Этот опыт станет базой для создания мобильных электролизных модулей, которые можно будет подключать к любому атомному блоку в зависимости от текущих потребностей рынка.

Инфраструктурные аспекты, безопасность и экономика

Создание мощностей по производству водорода – это лишь половина дела. Не менее важным является вопрос его безопасного хранения и транспортировки. Водород обладает экстремально высокой проникающей способностью и способен делать металлы хрупкими, что требует разработки совершенно новых конструкционных материалов. В России ведутся работы по созданию специальных марок стали и композитов, устойчивых к водородной болезни. Технологический спектр систем хранения охватывает все возможные состояния газа: от сжатия под сверхвысоким давлением в 700 бар до криогенного сжижения при температуре -253°C . Также активно исследуются методы химического связывания водорода в жидкие органические носители и аммиак. Хотя аммиак токсичен, он обладает огромным преимуществом: для его транспортировки уже существует развитая глобальная инфраструктура танкеров и терминалов, что может ускорить выход российского водорода на мировые рынки.

Экономическая модель атомно-водородной энергетики выглядит крайне привлекательной на фоне альтернатив. Использование АЭТС позволяет не только производить водород, но и создавать замкнутые циклы утилизации углекислого газа. Уловленный CO_2 может закачиваться в пласты для повышения нефтеотдачи или использоваться в производстве синтетического топлива, что делает водород фактически углеродно-нейтральным. Благодаря высокой плотности энергии ядерного топлива и способности АЭС работать в базовом режиме более 90 % времени в году, себестоимость такого водорода будет стабильно низкой и защищенной от рыночных шоков. В долгосрочной перспективе, за горизонтом 2040 года, планируется переход к полностью безуглеродным термохимическим циклам, где вода будет разлагаться на компоненты в ходе сложной цепочки реакций с использованием только тепла и катализаторов, что окончательно разорвет связь энергетики с ископаемым топливом [5].

Заключение

Подводя итог, можно сказать, что путь России к лидерству в атомно-водородной сфере четко разделен на этапы. Сейчас мы находимся на стадии завершения НИОКР и создания первых стендовых образцов топлива и реакторных узлов. Период до 2030 года станет временем пилотных проектов и отработки технологий на действующих АЭС. К середине 2030-х годов, с пуском первых промышленных АЭТС, страна получит мощнейший технологический фундамент, который обеспечит энергетическую независимость и экологическую устойчивость на столетие вперед. Интеграция высокотемпературных реакторов,

микросферического топлива и передовых методов электролиза позволит не только выполнить климатические обязательства, но и даст колоссальный импульс развитию смежных отраслей: от производства новых сталей до создания водородного транспорта и инновационной химии, закрепляя за Россией статус технологического лидера мирового масштаба.

Список литературы:

1. Российская Федерация. Распоряжение Правительства РФ от 12.10.2020 № 2634-р «Об утверждении плана мероприятий (дорожной карты) по развитию водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года».
2. Водородная энергетика – одно из стратегических направлений технологического развития России // Вестник Атомпрома. – 2023. – URL: <https://www.vestnik-atomprom.ru/> (дата обращения: 25.04.2026).
3. Пономарев-Степной, Н. Н. Атомно-водородная энергетика / Н. Н. Пономарев-Степной // Атомная энергия. – 2004. – Т. 96, № 6. – С. 403–415.
4. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы с гелиевым теплоносителем: технологии передачи тепла и безопасности: доклад на Общем собрании членов РАН. – Москва, 2020.
5. Российская Федерация. Указ Президента РФ от 16.04.2020 № 270 «О развитии техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2030 года».

© Гиматдинов И. Р., 2026

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ РОБОТИЗАЦИИ РЕГИОНА

студент **Ларионова Ксения Валерьевна**,
науч. руководитель: канд. соц. наук, доцент
Трегубова Наталья Дамировна,
Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассмотрено, как развивалась робототехника и взаимодействие человека с роботами (HRI). Также выделены основные элементы экосистемы, которые опираются на экономические и управленческие теории. В завершение предложены рекомендации для улучшения работы экосистемы.

Ключевые слова: роботизация, экосистема, регион, устойчивое развитие, HRI, социальные роботы.

Student **Larionova Kseniia Valeryevna**,
Academic Advisor: PhD in Sociology, Associate Professor
Tregubova Natalia Damirovna,
Saint Petersburg State University,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. This article examines the evolution of robotics and human-robot interaction (HRI). It describes the main components of the supporting ecosystem based on economic and managerial theories. The article concludes with recommendations on how to improve ecosystem efficiency.

Keywords: robotization, ecosystem, region, sustainable development, HRI, social robots.

На фоне постоянно увеличивающегося мирового спроса на автоматизацию промышленные предприятия активно осваивают новые цифровые технологии. Результатом этого стало то, что роботы, являющиеся одним из последних достижений, все чаще интегрируются в рабочие процессы компаний. В контексте устойчивого развития региональных социально-экономических систем робототехника в целом является ключевым фактором трансформации. По мере ее развития компании сосредоточились на необходимости предлагать более качественные продукты, совершенствовать свои технологии и продвигать новые разработки [1, с. 5-17].

Согласно данным Международной федерации робототехники (IFR), глобальная концентрация роботов составляет 162 единицы на 10 000 работников в ведущих странах [2]. В России этот показатель остается низким (29 роботов на 10 тысяч работников), что подчеркивает необходимость создания теоретической базы для создания роботизированной экосистемы в регионе для повышения конкурентоспособности. По словам Алексея Булынина, заместителя директора

Фонда развития промышленности Петербурга, озвученным на конференции «Роботизация: Новые уровни», Санкт-Петербург занял второе место в России по уровню роботизации после Московской области [3]. Статистика Росстата за 2024 год показывает, что в Петербурге было установлено 1869 роботов, что на 35 единиц меньше, чем в Московской области. Государство стимулирует развитие роботизации, предлагая предприятиям существенную поддержку.

Несмотря на лидерство Санкт-Петербурга, регион сталкивается с институциональными пробелами в экосистеме HRI: отсутствуют модели взаимодействия человека с роботом, модели принятия для периферийных регионов и механизмы преодоления восприятия роботов как «черного ящика» среди рабочих. Настоящая работа направлена на создание теоретического фундамента для развития экосистемы роботизации в пределах конкретного региона.

Согласно Международной федерации робототехники (International Federation of Robotics) определение робота, закрепленное в международном стандарте ISO 8373:2012 «Robots and robotic devices – Vocabulary» является следующим: робот – приводной механизм, программируемый по двум и более осям, имеющий некоторую степень автономности, движущийся внутри своей рабочей среды и выполняющий задачи по предназначению [4]. Робототехника эволюционировала от первых промышленных манипуляторов, вдохновленных пьесой Карела Чапека «R.U.R.», где в 1920 году впервые ввели термин «робот» [5]. Развитие продолжилось через Unimate 1954 года – первый серийный промышленный робот General Motors для сварки и погрузки на сборочных линиях. В 1970-х появились SCARA-манипуляторы для высокоточной сборки электроники, а также дельта-роботы для скоростной сортировки продуктов. Далее возникли коллаборативные промышленные роботы или *cobots*, например, UR5 от Universal Robots 2008 [6] года, которые работают бок о бок с людьми без ограждений. В 2025-2026 годах наблюдаются новые тенденции: рост автономных роботов с ИИ для принятия решений в реальном времени, цифровизация ПО и проникновение в нетрадиционные отрасли вроде 3D-печати.

Ныне ведущую роль играют социальные роботы, ориентированные на естественное взаимодействие с человеком. Среди социальных выделяют робота Pepper от Aldebaran Robotics и SoftBank 2014 года, который помогает в клиентском сервисе, гостиницах и обучении через распознавание эмоций и жестов; Nao 2006 года используется в робототехническом образовании для школьников, а также в терапии аутизма и реабилитации; Использование роботов Teresa и Double в качестве аватаров для обеспечения социального присутствия и участия в событиях, в частности, для поддержки пожилых людей и лиц с ограниченными двигательными возможностями.

Социальные роботы трансформируют наше взаимодействие с технологиями, переходя от выполнения простых функций к созданию эмоционально значимых связей в повседневной и профессиональной жизни. Согласно работе Д. В. Галкина из Томского национального исследовательского политехнического университета «Подходы и концепции социальных роботов с точки зрения гуманитарных исследований» [7], социальные роботы выступают не как обычные инструменты, а как активные участники социальных процессов, способствующие лучшему взаимопониманию и формированию общего видения в различных системах. В

2025–2026 гг. в России гуманитарные исследования HRI активно развиваются в университетах и институтах, фокусируясь на социокультурных аспектах взаимодействия. Например, в Московском авиационном институте (МАИ) ученые изучают [8] эмоциональные возможности социальных роботов для общественных пространств, подчеркивая их роль в навигации и техническом зрении как медиаторов социальных отношений. В Национальном исследовательском Томском государственном университете была опубликована работа [9] о представлении социальных роботов студентами РФ и Казахстана, где респонденты считают, что роботы не должны заменять человека в сфере обслуживания, требующей коммуникации и принятия этических решений, что раскрывает культурные стереотипы и ожидания. Эти работы дополняют глобальные тенденции, такие как метод цифровых двойников для обучения роботов без людей.

Эволюция робототехники от промышленных манипуляторов к социальным роботам демонстрирует переход от изолированных технологических предметов к сложным системам взаимодействия. Изначально простые машины, выполнявшие рутинные задачи, постепенно превращаются в умные роботы, способные учиться и адаптироваться к меняющимся условиям [10]. Однако техническая зрелость HRI сама по себе недостаточна для устойчивого развития регионов, требуется институциональная среда, обеспечивающая масштабирование технологий через кооперацию агентов (бизнес, образование, государство). Здесь ключевую роль играют экономические теории, объясняющие, как регионы трансформируют технологические инновации в конкурентные преимущества через организационные способности. Экосистема Рона Аднера и Теория динамических возможностей Дэвида Тиса предлагает концептуальную основу для анализа того, как регионы развивают поиск возможностей робототехники, захват рынков и реструктуризацию экосистем под роботизацию.

Р. Аднер определяет экосистему [11] как механизм сотрудничества, с помощью которого фирмы объединяют свои индивидуальные предложения в некоторое связанное и ориентированное на клиента [12, с. 6]. Ключевое отличие от традиционных цепочек создания стоимости – учёт комплементарных технологий и ресурсов, без которых основной продукт не может быть реализован. В рамках этой теории можно выделить несколько основных положений. Во-первых, речь идёт о взаимозависимости участников: успех одного актора зависит от действий других. Например, внедрение промышленных роботов требует не только производителей оборудования, но и разработчиков ПО для управления роботами, поставщиков сенсоров и компонентов, образовательных учреждений для подготовки операторов, а также сервисных центров для техобслуживания. Во-вторых, принципиально важна комплементарность: ценность продукта возникает только при сочетании нескольких технологий. Роботизация региона невозможна без инфраструктуры связи (5G/IoT), стандартов кибербезопасности и нормативно-правовой базы. В-третьих, отмечается асимметрия влияния: не все участники равнозначны. Выделяют «якорные» организации, то есть крупные предприятия, задающие спрос на роботизацию, поставщиков комплементарных решений (стартапы, НИИ) и институциональных акторов (государство, технопарки). В-четвертых, экосистема динамична: появление новых технологий меняет роли участников и создаёт новые взаимосвязи.

Функционирование экосистемы роботизации опирается на ряд ключевых механизмов. Первый – координация через платформы: создание единой цифровой платформы для обмена данными между роботами и системами управления, агрегации спроса от предприятий региона и размещения образовательных курсов. Второй – совместные инвестиции, реализуемые через государственно-частное партнёрство для строительства испытательных центров и субсидирования пилотных проектов. Третий – стандартизация, предполагающая разработку региональных стандартов совместимости оборудования, кибербезопасности и обучения персонала. Четвёртый – механизмы обратной связи, включающие опросы предприятий, хакатоны и акселераторы для учёта потребностей потребителей. Экосистема роботизации – это сеть взаимозависимостей, где провал одного звена (например, отсутствие квалифицированных кадров) блокирует развитие всей системы. Успех зависит от синхронизации стратегий всех участников: необходимо не просто финансировать проекты, а координировать взаимодействие всех сторон.

В настоящее время теория динамических способностей фирмы Дэвида Тиса является наиболее передовой школой стратегического менеджмента [13]. В своей статье 1997 года Дэвид Тис определил динамические возможности как способность фирмы «целенаправленно создавать, расширять или изменять свою ресурсную базу» [14, с. 5]. Теория динамических возможностей [15] объясняет, как организации и регионы адаптируются к быстро меняющейся внешней среде за счёт развития трёх взаимосвязанных способностей: *sensing* (обнаружение возможностей), *seizing* (захват возможностей) и *reconfiguring* (реконфигурация ресурсов). Применительно к роботизации региона эта теория позволяет описать, как территория накапливает и развивает компетенции для внедрения и масштабирования роботизированных решений.

На этапе *sensing* (обнаружение возможностей) регион осуществляет мониторинг глобальных трендов в области робототехники и автоматизации, включая промышленные и коллаборативные роботы, автономные транспортные средства и т. д. Одновременно анализируется спрос на роботизацию со стороны местных предприятий. Важной задачей становится выявление технологических пробелов и барьеров. Кроме того, на этом этапе оцениваются регуляторные изменения (стандарты безопасности, кибербезопасность, трудовое законодательство) и сканируются инновационные решения, предлагаемые стартапами, научно-исследовательскими институтами и вузами региона. После выявления перспективных направлений регион переходит к этапу *seizing* (захват возможностей), который предполагает активные действия. В рамках этого этапа создаются пилотные проекты по внедрению роботов на предприятиях, привлекаются различные виды инвестиций в робототехнические стартапы и научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Формируются специализированные институты развития, такие как технопарки и центры компетенций по робототехнике. Запускаются образовательные программы по робототехнике, программированию, искусственному интеллекту и управлению автоматизированными системами. Разрабатываются меры государственной поддержки: субсидии, налоговые льготы и гранты – для предприятий, внедряющих роботизацию. Ключевым аспектом здесь выступает быстрая мобилизация ресурсов для «захвата» рыночных ниш до того, как это сделают конкуренты. Третий этап –

reconfiguring (реконфигурация ресурсов) – предполагает долгосрочную трансформацию региональной экосистемы. На этом этапе перестраиваются образовательные программы вузов и колледжей под новые требования к кадрам, модернизируется промышленная инфраструктура. Формируются новые партнерства между предприятиями, научно-исследовательскими институтами, вузами и государством. Адаптируется нормативно-правовая база под внедрение автономных систем и искусственного интеллекта. Развиваются смежные отрасли, включая производство компонентов, разработку программного обеспечения и кибербезопасность. Успешные пилотные проекты масштабируются на другие предприятия региона. Для эффективного развития динамических возможностей в сфере роботизации региону необходимо реализовать ряд механизмов накопления компетенций. Прежде всего, следует создать координационный центр, который будет отвечать за синхронизацию процессов sensing-seizing-reconfiguring. Необходимо инвестировать в человеческий капитал: готовить специалистов, а также переподготавливать существующий персонал. Следует сформировать инновационную инфраструктуру – технопарки, акселераторы, испытательные полигоны для робототехнических решений. Таким образом, применение теории Тис к роботизации региона дает инструмент для анализа и проектирования стратегий технологического развития, основанных на гибком управлении ресурсами и быстрой адаптации к новым вызовам.

Проведённый анализ подтверждает, что роботизация выступает ключевым фактором трансформации региональных социально-экономических систем и повышения конкурентоспособности предприятий в условиях растущего глобального спроса на автоматизацию. Исследование показало, что для успешного развития региональной экосистемы роботизации необходим комплексный подход, сочетающий технологические, институциональные и социальные аспекты. Теоретическую основу для формирования такой экосистемы обеспечивают концепция экосистемы Р. Аднера, подчёркивающая взаимозависимость участников, комплементарность технологий и динамичность взаимодействий, а также теория динамических возможностей Д. Тиса, которая заложила основу для стратегии накопления региональных компетенций.

Список литературы:

1. Dickson K. E., Hadjimanolis A. Innovation and networking amongst small manufacturing firms in Cyprus // *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research*. – 1998. – Vol. 4, No 1. – P. 5–17.
2. International Federation of Robotics. Global robot density in factories doubled in seven years. – 2024.
3. РБК-Петербург. В Санкт-Петербурге [Электронный ресурс] // РБК-Петербург. – 2025. – 16 дек. – URL: https://www.rbc.ru/spb_sz/16/12/2025/694162209a79473d4e8f997f (дата обращения: 22.03.2026).
4. РБК-Петербург. В Санкт-Петербурге [Электронный ресурс] // РБК-Петербург. – 2025. – 16 дек. – URL: https://www.rbc.ru/spb_sz/16/12/2025/694162209a79473d4e8f997f (дата обращения: 22.03.2026).
5. Szabolcsi R. (2014). The birth of the term robot. *Advances in Military Technology*, 9(1), 117–128.

6. Siemens-pro.ru. Universal Robots UR5 [Электронный ресурс] // Siemens-pro.ru. – URL: <https://www.siemens-pro.ru/universal-robots/ur5.html> (дата обращения: 22.03.2026).
7. Galkin Dmitry V. Social robots: approaches and conceptions in the perspective of the humanities research // Журнал СФУ. Гуманитарные науки. – 2014. – № 6. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/social-robots-approaches-and-conceptions-in-the-perspective-of-the-humanities-research> (дата обращения: 22.03.2026).
8. МАИ. Российский гуманоидный робот Fyodor прошёл испытания на МКС [Электронный ресурс] // Московский авиационный институт (МАИ). – 2022. – URL: <https://mai.ru/press/news/detail.php?ID=182733> (дата обращения: 22.03.2026).
9. Зильберман Н. Н., Аманжолова А. Т., Журавлёва Е. В. Социальный робот в представлении студентов РФ и Республики Казахстан // Гуманитарная информатика. – 2015. – № 9. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sotsialnyy-robot-v-predstavlenii-studentov-rf-i-respubliki-kazahstan> (дата обращения 22.03.2026).
10. Dickson K. E., Hadjimanolis A. Innovation and networking amongst small manufacturing firms in Cyprus // International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research. – 1998. – Vol. 4, No 1. – P. 5–17.
11. Adner R. Ecosystem as structure: An actionable construct for strategy // Journal of management. – 2017. – Т. 43. – № 1. – С. 39–58.
12. Карпинская, В. А. Экосистема как единица экономического анализа / В. А. Карпинская // Системные проблемы отечественной мезоэкономики, микроэкономики, экономики предприятий. – 2018. – С. 125–141.
13. Тимофеев, Д. И. Динамические способности и неопределённость / Д. И. Тимофеев // Человек в условиях неопределённости: сборник научных трудов. – 2018. – С. 90.
14. Польшакова Н. В., Давтян А. М., Уварова М. Н. Стратегический менеджмент: идеи, концепции, подходы // Финансовый менеджмент. – 2025. – № 8. – С. 240–246.
15. Teece D. J., Pisano G., Shuen A. Dynamic capabilities and strategic management // Strategic Management Journal. – 1997. – Т. 18, № 7. – С. 509–533.

Примечание. При написании статьи были применены технологии искусственного интеллекта.

© Ларионова К. В., 2026

МЕЖДУНАРОДНЫЕ НЕФТЕГАЗОВЫЕ ОТНОШЕНИЯ: ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЧЕРЕЗ ДИПЛОМАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ГАРМОНИЗАЦИИ СТАНДАРТОВ

студент **Романова Анна Андреевна**,
науч. руководитель: канд. юрид. наук, доцент
Макарова Лидия Анатольевна,
Московский государственный юридический
университет имени О. Е. Кутафина,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье анализируются актуальные риски в международных нефтегазовых отношениях, вызванные блокадой Ормузского и Баб-эль-Мандебского проливов, а также структурными дисбалансами глобального спроса и предложения. Рассматриваются вопросы обеспечения энергетической безопасности, адаптации торговых цепочек, санкционного давления и эрозии нефтедолларовой системы. Обосновывается необходимость дипломатического подхода к гармонизации отраслевых стандартов как ключевого механизма снижения рисков в условиях геополитической нестабильности.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, международные нефтегазовые отношения, стандарты, дипломатический подход, риски.

INTERNATIONAL OIL AND GAS RELATIONS: ENSURING ENERGY SECURITY THROUGH A DIPLOMATIC APPROACH TO HARMONIZING STANDARDS

Student **Romanova Anna Andreevna**,
Academic Advisor: PhD in Jurisprudence, Associate Professor
Lidiya Anatolyevna Makarova,
Kutafin Moscow State Law University (MGUA),
Moscow, Russian Federation

Abstract. The article analyzes the current risks in international oil and gas relations caused by the blockade of Hormuz and Bab El-The Straits of Mandeb, as well as structural imbalances in global supply and demand. The issues of ensuring energy security, adaptation of trade chains, sanctions pressure and erosion of the petrodollar system are considered. The necessity of a diplomatic approach to the harmonization of industry standards as a key mechanism for reducing risks in the context of geopolitical instability is substantiated.

Keywords: energy security, international oil and gas relations, standards, diplomatic approach, risks.

Современная система международных нефтегазовых отношений переживает фундаментальную трансформацию. То, что еще недавно воспринималось как

устойчивая глобальная архитектура – с предсказуемыми маршрутами поставок, устоявшимися стандартами взаимодействия и относительно ясными правилами игры, – сегодня демонстрирует высокую степень турбулентности. Энергетическая безопасность, которая долгое время понималась преимущественно как техническая категория надежности поставок, приобрела комплексный геополитический, экономический и правовой характер [1, с. 12-15]. В этих условиях особую актуальность обретает дипломатический подход к согласованию стандартов – от технических регламентов на оборудование до финансовых механизмов расчетов, – поскольку именно гармонизация правил позволяет снижать риски и поддерживать предсказуемость в нефтегазовой сфере [6, с. 32-35]. При этом важно понимать, что риски не являются чем-то новым: история международного энергетического сотрудничества знает периоды не меньшего давления и конфликтов, однако именно выработка общих стандартов и дипломатическая культура взаимодействия не раз позволяли сохранять потоки углеводородов вопреки политическим разногласиям.

Одним из наиболее поучительных исторических прецедентов, демонстрирующих эффективность такого подхода, является развитие энергетического сотрудничества между Советским Союзом и Германией (как ФРГ, так и ГДР) в период с 1973 по 1983 год. Начиная с первого газового контракта в 1973 году и вплоть до завершения строительства газопровода «Уренгой-Помары-Ужгород», немецкие компании через «Промсырьеимпорт» поставили в СССР около 6 миллионов тонн труб большого диаметра и другое оборудование для магистральных трубопроводов. Параллельно Внешторгбанк СССР получил приблизительно 7,5 миллиарда немецких марок кредитов от немецких банков. За эти 11 лет компания Ruhrgas AG закупила у СССР 73 миллиарда кубометров природного газа – цифры, которые и сегодня впечатляют. Для сравнения, в 2017 году российские поставки газа в Германию составили более 53 миллиардов кубометров. Интересно, что поставки газа в Восточную и Западную Европу взаимно стимулировали друг друга: строительство газопровода в Чехословакию способствовало экспорту в Австрию, а ранние контракты с Австрией, ФРГ и Италией привели к программе расширения поставок газа в страны Варшавского блока. 21 июня 1974 года было подписано Генеральное соглашение СЭВ об освоении Оренбургского месторождения и строительстве газопровода «Союз», который, будучи изначально предназначенным для поставок в страны Варшавского договора, впоследствии использовался и для идеологических противников – Западной Европы. В сентябре 1978 года был сварен последний стык газопровода «Союз» протяженностью 2750 километров с пропускной способностью 26 миллиардов кубометров газа в год, которую обеспечивали 22 компрессорные станции. Приблизительно 900 километров «Союза» были построены интернациональными бригадами из Чехословакии, Польши, Болгарии, Венгрии и ГДР, что являлось блестящим примером гармонизации технических стандартов и рабочих процедур между странами с разными политическими системами. Примечательно, что в конце августа 1982 года, в разгар «холодной войны», семь европейских газовых компаний подписали с норвежской Statoil контракт на поставку газа с Северного моря (всего 1,5 миллиарда кубометров для Германии и 2 миллиарда кубометров для Франции, Нидерландов и Бельгии), который администрация США пыталась представить как успех в борьбе с потенциальной

зависимостью Европы от СССР. Однако реальность показала обратное: именно стандартизация трубопроводных систем, взаимное признание сертификатов и дипломатическое сопровождение проектов позволили создать единое газовое пространство от Сибири до Пиренеев. Этот исторический опыт прямо указывает на то, что даже в периоды острого политического противостояния международные нефтегазовые отношения могут устойчиво развиваться при условии следования согласованным стандартам и готовности к дипломатическому диалогу.

Сегодня, спустя четыре десятилетия, мир столкнулся с вызовами не меньшего, а возможно, и большего масштаба. Наиболее ярким и тревожным примером материализации рисков в международных нефтегазовых отношениях стала эскалация конфликта в районе Персидского залива, непосредственно затронувшая Ормузский пролив. Этот узкий морской коридор, соединяющий Персидский залив с Индийским океаном, исторически служил главной артерией для экспорта углеводородов из стран региона. По данным за первую половину 2025 года, через пролив ежедневно проходило порядка 14-15 миллионов баррелей сырой нефти и газового конденсата, а также до 6 миллионов баррелей нефтепродуктов [5]. В совокупности это составляло около 20-23 миллионов баррелей в сутки, или примерно 20-33 % мирового морского нефтяного транзита. Особое значение этот маршрут имеет для сжиженного природного газа, прежде всего катарского, который через Ормузский пролив направляется в Европу и Азию. С начала новой военной фазы на Ближнем Востоке фактическая блокада пролива Ираном привела к беспрецедентному сжатию предложения. Ситуация достигла критической точки в апреле 2026 года: 13 апреля США объявили о введении морской блокады, а в ответ Иран предпринял меры по минированию акватории. Кратковременное открытие пролива 18 апреля продлилось менее суток – Тегеран вновь ввел запрет, сославшись на сохранение американской блокады иранских портов. Таким образом, один из ключевых энергетических коридоров мира оказался практически перекрыт, что создало прямой дефицит на глобальном нефтяном рынке и спровоцировало рост цен, который лишь отчасти компенсируется альтернативными маршрутами.

К этому риску добавляется давление на другой стратегический узел – Баб-эль-Мандебский пролив, который соединяет Красное море с Аденским заливом и Индийским океаном [5]. Через этот пролив проходят суда, следующие из Персидского залива в Европу через Суэцкий канал, что делает его незаменимым звеном для доставки ближневосточной нефти и СПГ западным потребителям. Йеменские хуситы, поддерживающие определенные силы в регионе, заявили о готовности перекрыть пролив [4]. Даже без полной физической блокады угроза атак на танкеры в этом районе уже привела к росту страховых премий и вынужденному удлинению маршрутов. Суда, которые ранее проходили через Красное море, теперь огибают Африку с юга, что добавляет 10-15 суток к времени рейса, изымает из глобального оборота до 20 % свободного танкерного тоннажа и существенно повышает ставки фрахта [3]. Особенно уязвимы поставки катарского СПГ, который традиционно шел в Европу именно через Суэцкий канал, а теперь сталкивается с прямыми рисками недоставки. Это подрывает саму логику энергетической диверсификации, которую Европейский союз долгое время выстраивал как альтернативу зависимости от одного поставщика. Характерно, что еще недавно европейская доктрина исходила из того, что доля любого одного источника не

должна превышать 20 %, а превышение этого порога объявлялось катастрофой. Сегодня же, когда катарский газ может не дойти из-за блокировки проливов, а российский трубопроводный газ по политическим причинам ограничен, Европа вынуждена пересматривать свою риторику и, по выражению информированных источников, может и передумать. Этот зигзаг европейской энергетической политики наглядно демонстрирует, что стандарты диверсификации, не подкрепленные физической безопасностью маршрутов и дипломатическими гарантиями, остаются благими пожеланиями.

В сложившихся условиях особое значение приобретают обходные нефтепроводы, способные выводить углеводороды из региона Персидского залива в обход Ормузского пролива. Саудовская Аравия оперативно восстановила полную мощность прокачки по нефтепроводу «Восток-Запад», достигнув 7 миллионов баррелей в сутки, что позволяет направлять нефть к побережью Красного моря и далее – в обход опасной акватории. ОАЭ, в свою очередь, задействовали трубопровод ADCOP (Abu Dhabi Crude Oil Pipeline) мощностью от 1,5 до 1,8 миллиона баррелей в сутки до порта Фуджейра на побережье Оманского залива. По имеющимся оценкам, загрузка этой магистрали составляет примерно 71 %, то есть свободный резерв достигает около 440 тысяч баррелей в сутки. В масштабах двух систем – саудовской и эмиратской – суммарный резерв свободных мощностей оценивается примерно в 2,6 миллиона баррелей в сутки. Однако этого явно недостаточно для компенсации 20-23 миллионов баррелей, ранее проходивших через Ормузский пролив. Более того, поступали сообщения об ударах по терминалам на Красном море и о возгораниях на альтернативных маршрутах в ОАЭ, что дополнительно осложняет ситуацию. Иран, как сообщается, наносит удары не только по самому проливу, но и по конечным точкам обходных нефтепроводов – портам на Оманском заливе и Красном море, вынуждая эвакуировать персонал и останавливать прокачку. Таким образом, физический дефицит предложения остается, и цены на нефть чутко реагируют на каждый новый сигнал.

Неудивительно, что биржевые котировки эталонной смеси Brent уверенно превысили отметку 100 долларов за баррель и, по прогнозам аналитиков Goldman Sachs, при сохранении пролива закрытым еще на месяц могут оставаться выше этой планеты в течение всего 2026 года. При условии дальнейшего разрастания конфликта ряд экспертов допускает рост до 150-200 долларов за баррель. Показательно, что российская нефть сорта ESPO (Eastern Siberia – Pacific Ocean) впервые за последние десять лет превысила 100 долларов за баррель, а дисконт к эталонным сортам сократился практически до нуля. Более того, на фоне глобального дефицита российские нефтепродукты иногда реализуются без скидок или даже с надбавкой к рыночной цене – ситуация, которая еще два-три года назад казалась немыслимой. Колебания цен в течение недели отражают не только реальное состояние спроса и предложения, но и новостной фон: заявления Дональда Трампа о возможных переговорах с Ираном вызывали временное снижение котировок ниже 100 долларов, однако оперативные опровержения из Тегерана и заявления Израиля о продолжении бомбардировок быстро возвращали цены на прежний высокий уровень. Рынок явно закладывает долгосрочный характер конфликта. Одновременно с этим Европа и Азия ощущают последствия и на потребительском уровне: в Австралии сотни заправок остались без горючего, в

странах Юго-Восточной Азии наблюдаются перебои с топливом, а в Германии введены ограничения – заправочным станциям разрешено повышать цены не более одного раза в день, что является явным признаком нерыночного давления.

Параллельно с ближневосточными рисками обостряются структурные дисбалансы в глобальном потреблении и меняется сама конфигурация доказанных запасов. В этом контексте важно привести уточненные данные по ресурсной базе Российской Федерации. Из заявленных 31 миллиарда тонн общих запасов нефти только 19 миллиардов тонн в настоящее время являются подготовленными, а 12 миллиардов тонн – неподготовленными, причем последние обычно уменьшаются при переводе в доказанные. Более того, из этих 19 миллиардов тонн доказанных запасов, по текущим подсчетам, лишь около 13 миллиардов тонн реально пригодны к рентабельной разработке в текущих ценовых и налоговых условиях. Таким образом, фактически доступные и экономически целесообразные запасы нефти в РФ составляют не 31 миллиард тонн, а приблизительно 13 миллиардов тонн [9, с. 5-7]. Это обстоятельство необходимо учитывать при любых долгосрочных международных проектах: стандарты подсчета запасов (например, SPE или PRMS) должны гармонизироваться, чтобы избегать завышенных ожиданий и инвестиционных ошибок. Соединенные Штаты, являясь крупнейшим потребителем нефти в мире (около 20 миллионов баррелей в сутки), собственными силами добывают лишь 13,4-13,5 миллиона баррелей. Образующийся дефицит традиционно покрывается за счет стратегических резервов и импорта. Однако резервы не безграничны: их можно использовать для временного «затыкания дыр», но такая стратегия не может быть бесконечной. На другом конце Евразии Китай, крупнейший в мире импортер нефти, закупает около 550 миллионов тонн ежегодно, что превышает годовую добычу России (примерно 516 миллионов тонн). В газовом секторе Россия является значимым поставщиком для Китая: в 2024 году российские поставки сжиженного природного газа составили около 84 миллионов тонн, сформировав заметную долю в китайском импорте СПГ. Помимо СПГ, Россия также поставляет Китаю значительные объемы трубопроводного газа, регулярно предлагая дальнейшее увеличение объемов для удовлетворения растущих энергетических потребностей КНР. При этом в отношениях с Китаем прослеживается потенциал увеличения поставок российского газа, несмотря на беспокойство Пекина относительно чрезмерной зависимости. Дополнительный газовый маршрут уже в процессе реализации: дальневосточный маршрут поставок российского газа, решение о котором было принято в 2022 году, свидетельствует о том, что для Китая, когда ему нужен газ, геополитические соображения отходят на второй план. Поставки по этому маршруту, начинающиеся с 2027 года, будут осуществляться из Приморского края к китайской границе, требуя достройки лишь нескольких десятков километров трубопровода как ответвления от уже действующего газопровода «Сахалин-Хабаровск-Владивосток». Объем этих поставок составит 10 миллиардов кубометров. Более масштабным является проект «Сила Сибири-2» мощностью 50 миллиардов кубометров газа в год. Его конкурентное преимущество – наличие готовой ресурсной базы, в отличие от первого «Силы Сибири», который требовал разработки с нуля Чаяндинского и Ковыктинского месторождений. Для «Силы Сибири-2» уже есть подготовленные месторождения, и часть внутрироссийских газопроводов также существует.

Российской стороне останется построить лишь часть трубы на своей территории, монгольский участок и китайскую часть. Этот пример показывает, что гармонизация технических стандартов строительства и эксплуатации трансграничных газопроводов является непременным условием для реализации подобных мегапроектов.

Одновременно Россия активно развивает газовое сотрудничество с Ираном. Планируются поставки до 1,8 миллиарда кубометров газа в год в северные регионы Ирана, а Тегеран намерен подписать контракты на 4 миллиарда долларов для разработки семи иранских месторождений. Примечательно, что Иран, обладающий вторыми в мире разведанными запасами газа после России, крупнейшее трансграничное месторождение «Южный Парс», разделяемое с Катаром, сталкивается с проблемой внутренней логистики: газ с юга необходимо перекачивать на север, в том числе для снабжения Тегерана. Здесь открывается поле для гармонизации стандартов и совместных инфраструктурных решений, что напрямую выходит на тему дипломатического согласования технических и коммерческих правил. Не менее значимым долгосрочным риском для международных нефтегазовых отношений является отход от нефтедолларовой системы. Та модель, заложенная в 1970-е годы соглашением между США и Саудовской Аравией, предполагала, что все расчеты за нефть ведутся в долларах, а вырученные средства реинвестируются в американские государственные облигации. Это создавало искусственный, но устойчивый спрос на доллар во всем мире. В обмен на это США предоставляли странам Персидского залива военные гарантии безопасности, включая размещение своих баз. Сегодня эта модель дает трещину. Во-первых, сами гарантии безопасности перестали восприниматься как абсолютные: наличие американских баз на территории Саудовской Аравии или ОАЭ делает эти страны потенциальными целями для ударов. Во-вторых, Китай активно продвигает расчеты в юанях за поставляемую нефть. По данным аналитиков Deutsche Bank, к марту 2026 года доля юаня в расчетах за нефть на Ближнем Востоке достигла 41 %, а доля доллара впервые опустилась ниже 55 %. Саудовская Аравия рассматривает возможность приема юаней в оплату части поставок в Китай, а ОАЭ пригрозили переходом на другие валюты. Аналитики Deutsche Bank констатируют: на смену нефтедоллару может прийти «нефть-юань», что станет тектоническим сдвигом в международных финансах [10, с. 530-535]. Дипломатический подход к гармонизации стандартов в этой сфере означает выработку многосторонних правил валютного и платежного клиринга, которые позволили бы снизить транзакционные риски при переходе к мультивалютной системе.

Не менее важным аспектом является реакция международного нефтегазового бизнеса на санкционное давление и сопутствующие риски. Введенные в ноябре – декабре 2025 года санкции против «Роснефти» и «Лукойла» с включением их в SDN List (самый жесткий санкционный перечень США) стали серьезным вызовом, но не привели к драматическому коллапсу поставок. По состоянию на 16 ноября 2025 года общий объем российских поставок нефти и нефтепродуктов по-прежнему превышал 7,5 миллиона баррелей в сутки. За четыре недели зафиксировано сокращение лишь на 90 тысяч баррелей, что незначительно на фоне среднего уровня морских отгрузок, составлявшего около 1,66 миллиона баррелей в сутки.

Для сравнения, до событий 2022 года этот объем составлял 2,4–2,5 миллиона баррелей в сутки. Европа, пытаясь ввести санкции, превратила международное коммерческое и морское право в «решето», как отмечают эксперты. Россия в текущей ситуации не будет добровольно снижать добычу. Если эмбарго на поставки российской нефти, введенное еще 5 декабря 2022 года, поначалу стало шоком и вынудило сократить экспорт, приведя к добровольному ограничению добычи на 500 тысяч баррелей в сутки, то сейчас рынок полностью адаптировался. Важно понимать природу дисконта. Часто под дисконтом понимают разницу между ценой Urals в российских портах (Приморск и Новороссийск) и ценой Dated Brent. Однако существует и более показательный дисконт – разница между ценой российской нефти уже в порту покупателя, например, в Западной Индии или Китае, и эталонными марками. Этот дисконт в портах Западной Индии за первые две недели ноября 2025 года не вырос даже на 2 доллара и составляет менее 4 долларов за баррель. Именно эта цифра отражает реальную стоимость российской нефти для конечного покупателя. Продолжение публикации этого индекса подтверждает, что Индия продолжает активно покупать российскую нефть. Китай, в свою очередь, принял аналогичный подход: частные китайские НПЗ, особенно в провинции Шаньдун, часто используют санкционную нефть, причем не только российскую, но и венесуэльскую, которая официально не проходит через китайскую таможенную статистику, а скрывается под видом малазийского битума [1, с. 16]. В этих условиях российские компании, такие как «Роснефть» и «Лукойл», вынуждены перепаковывать свои контракты, меняя трейдеров, удлиняя логистические цепочки и адаптируя маршруты поставок. Примером такого воздействия стало включение Великобританией в свой санкционный список Litaco – торгового подразделения «Лукойла». В ответ на это «Лукойл» оперативно учредил новую трейдинговую компанию в Дубае, через которую продолжил свои коммерческие операции. Хотя такой шаг повлек за собой дополнительные административные и финансовые издержки на перерегистрацию сделок, эти расходы оказались вполне посильными. Это прямая иллюстрация того, как стандарты корпоративного управления и международного трейдинга адаптируются к новым реалиям – причем адаптация происходит не через разрушение, а через создание новых юридических лиц и цепочек, что требует, в свою очередь, дипломатического признания этих новых структур или, по крайней мере, молчаливого согласия со стороны принимающих юрисдикций (ОАЭ, Турции, стран Азии).

Не менее драматично развивается ситуация вокруг зарубежных активов российских нефтяных компаний, особенно «Лукойла». OFAC, Управление по контролю за иностранными активами Минфина США, фактически предписывает «Лукойлу» найти с их точки зрения «правильного» покупателя для своих зарубежных активов. Европейский трейдер Gunvor пытался приобрести эти активы и, обратившись в Минфин США, получил отказ под предлогом, что является «марионеткой Кремля» – решение очень странное, учитывая кипрскую регистрацию компании со швейцарскими акционерами. Сегодня интерес проявляет Chevron. Однако даже в случае успешной сделки средства от продажи зарубежных активов «Лукойла» будут направлены на замороженные счета, что, по сути, является «инструментом откровенного грабежа», как характеризуют это эксперты. Зарубежная собственность «Лукойла» обширна: добывающие проекты в

Казахстане, Узбекистане и Африке, крупное месторождение Западная Курна-2 в Ираке, значительные активы в переработке и сбыте в Европе (45 % доля в Нидерландах, 100 % доли в Болгарии и Румынии). Ситуация в Болгарии служит ярким примером. Парламент принял закон о передаче НПЗ «Лукойла» под внешнее управление одного из правительственных институтов, подразумевая возможность его последующей продажи. Президент страны наложил вето на этот закон, ссылаясь на европейские нормы, однако парламент смог преодолеть вето. Это показывает, что стандарты защиты собственности в рамках единой Европы могут трактоваться по-разному, а политическое давление способно перевешивать букву закона. Схожая ситуация наблюдается в Сербии, где министр объявил о поиске покупателя для компании «Naftna Industrija Srbije». Однако в этом случае у «Газпрома», как конечного владельца актива, имеется серьезный рычаг влияния: он поставляет газ в Сербию по комфортным ценам и открыто заявил, что в случае проблем с заводом или его продаж без согласования право на продление газового контракта может быть не предоставлено. Таким образом, дипломатический подход и взаимная зависимость в энергетике оказываются более действенными, чем односторонние санкции. Это важный урок для гармонизации стандартов: любые международные нефтегазовые проекты должны изначально предусматривать механизмы разрешения споров, не привязанные к политической конъюнктуре.

Значимую роль в реформировании мировых нефтяных потоков играет Казахстан. Сорт казахстанской нефти КЕВСО весьма схож с российской Urals. Когда казахстанская нефть поступает в российскую систему «Транснефти» для прокачки к Балтийскому морю, она смешивается с российской нефтью, и на выходе из терминалов фактически отгружается как Urals. Однако для избежания претензий со стороны европейских потребителей казахстанская сторона ввела отдельный сорт КЕВСО. В Германию по этому маршруту поставляется относительно небольшой объем – 2,5 миллиона тонн в год, с планами увеличения до 3 миллионов тонн [7, с. 3-4]. Основным же экспортным маршрутом для казахстанской нефти – это Каспийский трубопроводный консорциум, по которому Казахстан прокачивает примерно 60-65 миллионов тонн нефти. Эта нефть, загружаемая в танкеры в Новороссийске, традиционно направляется в страны Южной Европы, в частности, в Италию. В последние годы значительно увеличились поставки в Болгарию, где казахстанская нефть успешно заместила российскую благодаря удобному и короткому транспортному плечу [2]. Этот пример показывает, как стандартизация качества нефти (смешение разных сортов) может быть как источником риска (обвинения в обходе санкций), так и инструментом гибкости. Дипломатическая работа по признанию КЕВСО как самостоятельного сорта, не подпадающего под санкционные ограничения, – образец того, как гармонизация стандартов (в данном случае – классификации нефтяных смесей) способствует сохранению международной торговли.

Другим интересным сюжетом, демонстрирующим изменчивость международных нефтегазовых отношений, является возвращение Венесуэлы на мировой рынок. На долгое время фактически исключенная из мировых нефтяных потоков под санкциями США, Венесуэла вновь появляется на горизонте. Впервые за долгое время США импортировали танкер венесуэльской нефти по специально выданной лицензии. С 2019 года США запретили многим странам покупать

венесуэльскую нефть, и именно Россия заняла это место на американском рынке: к 2021 году Россия стала третьим по величине поставщиком нефтепродуктов в США, предлагая схожие сорта. Если США стремятся вытеснить российскую нефть, им, по логике, необходимо было бы сменить власть в Венесуэле, чтобы под этим предлогом снять санкции и стимулировать наращивание объемов производства. Однако здесь есть серьезные проблемы. С одной стороны, Венесуэла обладает крупнейшими в мире запасами нефти – 304 миллиарда баррелей, что превосходит запасы Саудовской Аравии (298 миллиардов) и составляет 17,5 % всех мировых резервов. С другой стороны, это преимущественно сверхтяжелая нефть бассейна Ориноко, добыча которой требует сложных технологических решений, таких как паронагнетание или разбавление нефтью. Нефтяная отрасль Венесуэлы сильно деградировала, и для ее восстановления требуются многие годы и значительные инвестиции, а также устойчиво высокие мировые цены – иначе добыча будет нерентабельной. Возникает вопрос: готовы ли крупные американские компании к долгосрочным инвестициям при непредсказуемой политической обстановке и ценовой волатильности? Этот кейс напрямую связан с темой стандартов: для разработки венесуэльской сверхтяжелой нефти необходимы единые технические стандарты (паронагнетание, разбавители, экологические нормы), которые пока не гармонизированы даже внутри ОПЕК.

Внутри самой России угрозы энергетической безопасности имеют и внутреннее измерение. На Санкт-Петербургской бирже цены на бензин и дизельное топливо пока остаются относительно стабильными, за исключением небольшого роста Аи-92. Однако реальное положение дел на внутреннем топливном рынке сложнее, поскольку на бирже торгуется лишь небольшая часть бензина. В апреле – мае традиционно возрастает спрос на дизельное топливо из-за посевной и сезонного перехода с зимнего на летнее дизельное топливо. Армия и сельское хозяйство – основные потребители дизеля, и правительство не намерено запрещать его экспорт, используя иные методы воздействия на нефтяные компании. Что касается бензина, ситуация – более напряженная. Запрет на экспорт бензина для перекупщиков уже действует, и обсуждается его распространение на вертикально-интегрированные компании. Ранняя теплая погода в центральной России открыла автомобильный сезон раньше обычного, а внутренний туризм на автомобилях после пандемии COVID-19 остается популярным. Возникает вопрос о необходимости строительства новых нефтеперерабатывающих заводов с упором на бензин, особенно на Дальнем Востоке и в Сибири. На Дальнем Востоке уже были перебои с поставками на заправках, и одна из мер – предоставление скидок на железнодорожную перевозку бензина с запада на восток – хотя и помогает, но загружает железную дорогу, которая и так активно используется для торговли. Ключевым индикатором для государства является уровень инфляции: рост цен на бензин и дизель не должен превышать инфляцию. В 2024 и 2025 годах этот показатель не был достигнут, но правительство продолжает удерживать ситуацию с помощью демпфирующего механизма, при котором разница между экспортной ценой и индикативной внутренней ценой компенсируется нефтяным компаниям из бюджета. Этот механизм – пример того, как национальные стандарты регулирования топливного рынка могут быть использованы для сглаживания

внешних шоков, однако его эффективность ограничена, если мировые цены надолго уходят вверх из-за перекрытых проливов [8].

На фоне всех этих вызовов появляются и обнадеживающие признаки потенциального восстановления партнерских программ между российскими и американскими энергетическими компаниями. Поступали сообщения о возможном возвращении ExxonMobil в проект «Сахалин-1» и заинтересованности в приобретении доли в разработке газового месторождения на Аляске. Переговоры оцениваются как конструктивные, хотя их дальнейшая динамика будет зависеть от развития геополитической ситуации. Российская стратегия нацелена на создание в США круга заинтересованных сторон, которые выступали бы за отмену санкций. Для этого предлагаются конкретные сделки: уступки по политическому треку в обмен на осязаемые проекты и цифры. Примечательно, что такие предложения поступают, несмотря на довольно жесткий выход ExxonMobil из России: если Shell покинула «Сахалин-2» относительно мягко, просто отозвав персонал, то ExxonMobil фактически саботировала работу «Сахалина-1», остановив добычу на несколько месяцев, пока «Роснефть» героически восстанавливала ее. Несмотря на такие обиды, российская сторона демонстрирует прагматичный деловой подход, что является воплощением дипломатического подхода к стандартам, даже когда политические отношения на минимальном уровне.

Таким образом, текущая ситуация в Ормузском и Баб-эль-Мандебском проливах служит не просто эпизодом регионального конфликта, а индикатором глубинной неустойчивости всей конструкции международных нефтегазовых отношений. Анализ современных рисков показывает, что ни одна страна или группа стран не может в одиночку гарантировать себе энергетическую безопасность в изоляции. Напротив, требуются совместные усилия по созданию резервных транспортных коридоров, модернизации альтернативных маршрутов, выработке единых правил игры. Исторический опыт советско-германского сотрудничества 1970-1980-х годов, современные примеры адаптации трейдинговых структур, успешное смещение казахстанской и российской нефти через КТК, попытки вернуть ExxonMobil – все это свидетельствует о том, что даже в условиях острого противостояния международные нефтегазовые отношения способны находить обходные пути, если стороны придерживаются хотя бы минимально согласованных стандартов. Дипломатический подход к гармонизации этих стандартов – от технических норм строительства трубопроводов до правил валютных расчетов и признания новых юридических лиц – становится не просто желательным, а необходимым условием для снижения существующих рисков. Только такая комплексная, многоуровневая работа способна превратить сегодняшний хаос: заблокированные проливы, колеблющиеся цены, эрозию доверия и фрагментацию рынков – в более упорядоченную систему, где риски идентифицируются, а механизмы их снижения согласованы заранее. Это позволит заложить фундамент для более предсказуемой и устойчивой глобальной энергетической системы, в которой международные нефтегазовые отношения будут регулироваться не сиюминутной конъюнктурой, а долгосрочными, взаимно признанными правилами.

Список литературы:

1. Анисимова, Н. Н. Геополитика энергетической безопасности в современных условиях рисков и неопределенностей / Н. Н. Анисимова. – Текст: электронный // Региональные проблемы преобразования экономики. – 2025. – № 7. – С. 12-19. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geopolitika-energeticheskoy-bezopasnosti-v-sovremennyh-usloviyah-riskov-i-neopredelennostey> (дата обращения: 25.04.2026).
2. Дудченко, Н. (аналитик ФГ «Финам»). Экспорт нефти из Казахстана может снизиться на 40 % после атак на терминал КТК / Н. Дудченко. – Текст: электронный // Коммерсантъ. – 2025. – 3 декабря. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/8250518> (дата обращения: 25.04.2026).
3. Ибрагимов, Ф. Энергономика. Если и будет сокращение экспорта нефти, то незначительное: беседа с К. Симоновым / Ф. Ибрагимов, ведущий П. Анисимов. – Аудио: электронный ресурс // Смотрим.Ру. – 2026. – 17 апреля. – URL: <https://smotrim.ru/video/3043924> (дата обращения: 25.04.2026).
4. Кнутов, Ю. (военный эксперт). Две суперсилы все решат: в Ормузском проливе начнется бой на выживание / Ю. Кнутов. – Текст: электронный // Аргументы и Факты. – 2026. – 16 апреля. – URL: <https://aif.ru/society/dve-supersily-vse-reshat-v-ormuzskom-prolive-nachnetsya-boy-na-vyzhivanie> (дата обращения: 25.04.2026).
5. Кузнецов, Д. Е. Угроза транзиту через Ормузский пролив создаст давление на рынки нефтехимии / Д. Е. Кузнецов; Институт экономической политики имени Е.Т. Гайдара. – Текст: электронный // Комментарий РИА Новости. – 2026. – 2 марта. – URL: <https://ria.ru/20260302/ekspert-2077872581.html> (дата обращения: 25.04.2026).
6. Мастепанов, А. М. Новые аспекты энергетической безопасности во фрагментированном геополитическом пространстве / А. М. Мастепанов. – Текст: электронный // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2025. – № 7 (247). – С. 31-42. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82623181> (дата обращения: 25.04.2026).
7. Минэнерго Республики Казахстан. «Альтернативы КТК нет»: что будет с экспортом нефти. – Текст: электронный. – 2025. – 9 декабря. – С. 2-6. – URL: <https://ulysmidia.kz/news/63916-alternativy-ktk-net-v-minenergo-obiasnili-cto-budet-s-eksportom-nefti/> (дата обращения: 25.04.2026).
8. Минэнерго РФ. Данные презентации «Стратегия развития нефтяной отрасли до 2050 года: задачи, решения и результаты»: материал И. Кезик. – Текст: электронный // Известия. – 2025. – 16 сентября. – URL: <https://iz.ru/1955149/irina-kezik/zelenyj-negorit-raschety-za-rossijskuyu-neft-v-dollarah-upali-do-5> (дата обращения: 25.04.2026).
9. Роснедра (Федеральное агентство по недропользованию). Выступление главы агентства на совещании по развитию минерально-сырьевой базы РФ. – Текст: электронный. – Сентябрь 2025. – С. 4-7. – URL: <https://rosnedra.ru/press/news/v-sovete-federatsii-obsudili-strategiyu-razvitiya-mineralno-syrevoy-bazy-rossii/> (дата обращения: 25.04.2026).
10. Сечин, И. И. Россия как гарант мировой энергетической безопасности в условиях геополитического сдвига / И. И. Сечин. – Текст: электронный // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. – 2024. – Т. 40. – № 4. – С. 525-561. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rossiya-kak-garant-mirovoy-energeticheskoy-bezopasnosti-v-usloviyah-geopoliticheskogo-sdviga> (дата обращения: 25.04.2026).

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

аспирант **Муравьев Глеб Геннадьевич**,
науч. руководитель: доктор техн. наук, профессор
Белов Михаил Петрович,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье исследуется вопрос получения полезной электрической мощности из техногенных вибраций энергетического оборудования. Осуществлен анализ спектральных параметров колебаний конструктивных элементов трансформаторов и предложено использовать специализированные консольные пьезоэлементы. На основе проведенных расчетов доказана возможность реализации безаккумуляторных сенсорных сетей для нужд современной электроэнергетики.

Ключевые слова: сбор микроэнергии, пьезогенерация, силовой трансформатор, вибрационный мониторинг, автономные датчики, Smart Grid.

PROSPECTS FOR THE USE OF PIEZOELECTRIC CONVERTERS FOR POWERING DIAGNOSTIC EQUIPMENT OF POWER TRANSFORMERS

Postgraduate Student **Muravev Gleb Gennadievich**,
Academic Advisor: Grand PhD in Engineering, Professor
Belov Mihail Petrovich,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. This article explores the possibility of generating useful electrical power from man-made vibrations in power equipment. An analysis of the spectral parameters of vibrations in transformer components is conducted, and the use of specialized cantilever piezoelectric elements is proposed. Based on the calculations performed, the feasibility of implementing battery-free sensor networks for the needs of the modern electric power industry is demonstrated.

Keywords: energy harvesting, piezogenesis, power transformer, vibration monitoring, autonomous sensors, Smart Grid.

Введение. Развитие концепции Smart Grid требует непрерывного мониторинга состояния высоковольтных активов. Основным барьером для масштабного внедрения беспроводных датчиков остается ограниченный ресурс химических источников тока. В данной работе исследуется альтернативный метод – извлечение электрической энергии из механических колебаний корпуса и

радиаторных систем трансформаторов [1], вызванных магнитострикцией и электродинамическими процессами.

Анализ вибрационных воздействий. Согласно проведенным измерениям на оборудовании серии ТСЛ, основной энергетический потенциал механических возмущений сосредоточен на частоте 100 Гц. Амплитуда ускорений на конструктивных элементах достигает 6 м/с^2 , что делает данные вибрации стабильным и предсказуемым источником для резонансных систем сбора микроэнергии [2].

Обоснование выбора конструкции. Для эффективной работы в низкочастотной области (до 100 Гц) целесообразно использовать преобразователи консольного типа. В ходе исследования был выбран униморфный элемент на латунной подложке, промаркированный *PZT* на рисунке 1. Подобная конфигурация, в отличие от многослойных сборок, обладает высокой устойчивостью к циклическим деформациям и меньшей хрупкостью. За счет подбора геометрии пластины и массы инертного груза достигается механический резонанс, что критически важно для максимизации выходного напряжения.

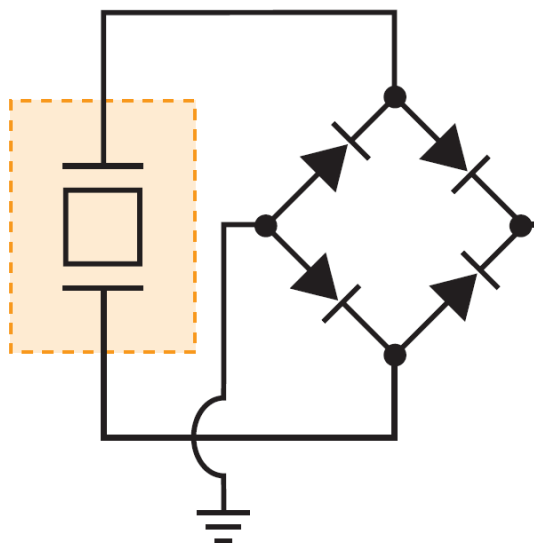


Рисунок 1. Схема электрической части с выпрямителем

Энергетический потенциал и практическая значимость.

Для определения потенциальной вырабатываемой мощности было проведено моделирование, которое свидетельствует, что при типичной для силового трансформатора вибрационной нагрузке один пьезоэлемент способен генерировать мощность на уровне 0,25 мВт (рис. 2).

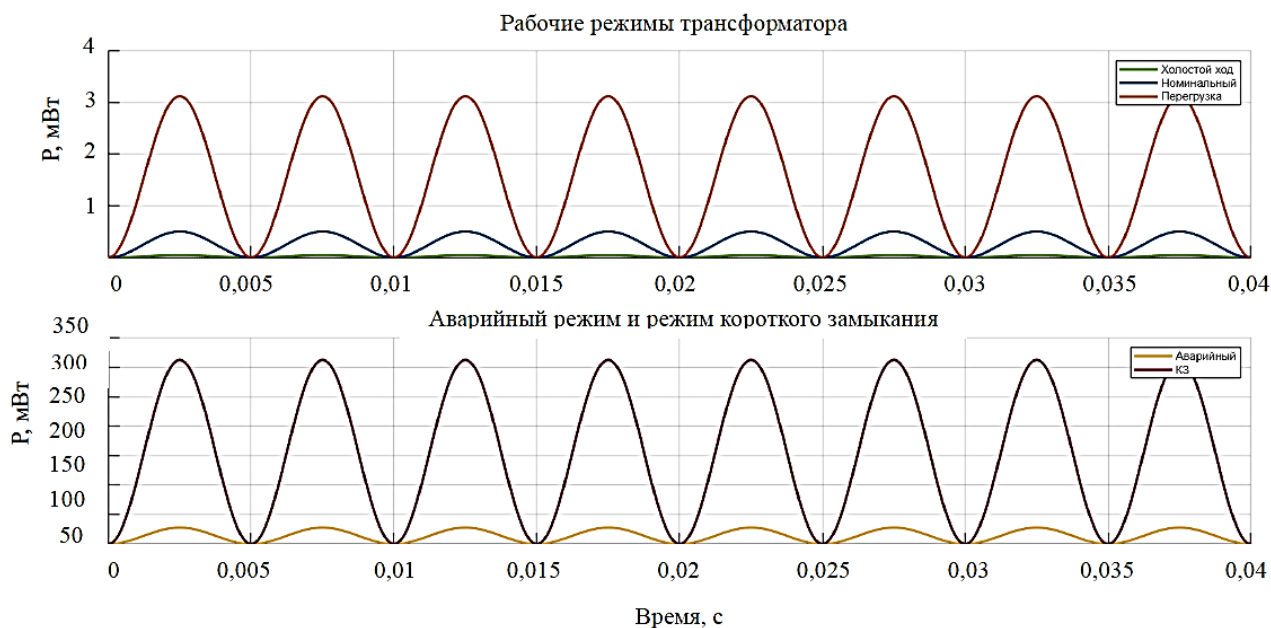


Рисунок 2. Выходные характеристики пьезоэлектрического генератора в зависимости от режима работы силового трансформатора

В ходе имитационного моделирования была выявлена четкая корреляция между интенсивностью механических колебаний узлов трансформатора и выходными электрическими характеристиками пьезоэлемента (*PZT*). При работе оборудования в режиме холостого хода энергетический выход остается минимальным. Такие показатели накладывают жесткие ограничения на архитектуру системы мониторинга, позволяя ей функционировать исключительно в режиме глубокого микропотребления. Качественное изменение ситуации наблюдается при переходе силового агрегата к номинальной нагрузке. В этих условиях параметры генерации достигают расчетных значений: выходное напряжение стабилизируется в районе 5,0 В, а мгновенная пиковая мощность возрастает до 0,5 мВт. Данного энергетического потенциала вполне достаточно для обеспечения бесперебойного питания современных беспроводных сенсорных узлов.

Закключение. Переход к использованию пьезоэлектрических накопителей энергии (energy harvesters) [3, 4] позволяет значительно повысить надежность интеллектуальных сетей. Предложенная в работе методика настройки резонансных частот обеспечивает стабильную работу системы в реальных условиях эксплуатации силового оборудования. Дальнейшее развитие темы связано с поиском оптимальных точек размещения генераторов на радиаторных секциях для достижения максимального КПД.

Список литературы:

1. Программный модуль автоматизированного анализа выходных характеристик пьезогенератора при кинематическом (вибрационном) возбуждении: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2026660956 Российская Федерация / Муравьев Г. Г.; правообладатель Муравьев Г. Г. – № 2026619970/69; заявл. 10.04.26; опубл. 16.04.26.
2. Шульга, Ю. Современные изделия пьезоэлектроники: Новые возможности /

- Ю. Шульга, А. Итальянцев (и др.) // Электроника НТБ. – 2015. – № 5. – С. 96–103.
3. Самойлов, В. Б. Пьезоэлектрический генератор постоянного тока: патент 2113757 Рос. Федерация: № 93014381: заявл. 19.03.1993: опубл. 20.05.1998. – 5 с.
4. Mide Technology: официальный сайт. – URL: mide.com (дата обращения: 12.01.2026).

© Муравьев Г. Г., 2026

ИНТЕРПРЕТИРУЕМОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ НЕУЧТЁННОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ГРАДИЕНТНОГО БУСТИНГА И ЗНАЧЕНИЙ ШЕПЛИ

ассистент **Моргоев Иrbек Джабраилович**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент
Дзгоев Алан Эдуардович,
Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(Государственный технологический университет),
г. Владикавказ, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматривается задача выявления неучтённого потребления электроэнергии на основе данных, автоматически собираемых цифровыми приборами учёта и хранимых в АИИС КУЭ. Предложен подход, сочетающий ансамблевую модель градиентного бустинга и аддитивный анализ Шепли (SHAP) для интерпретации прогнозов. Показано, что использование SHAP повышает прозрачность решений и позволяет формировать обоснованные гипотезы о характере выявленных аномалий.

Ключевые слова: неучтённое потребление электроэнергии, АИИС КУЭ, машинное обучение, CatBoost, интерпретируемость моделей, SHAP, анализ данных.

INTERPRETABLE DETECTION OF NON-TECHNICAL LOSSES IN ELECTRICITY CONSUMPTION USING GRADIENT BOOSTING AND SHAPLEY VALUES

Assistant Lecturer **Morgoev Irbek Dzhabrailovich**,
Academic Advisor: PhD in Engineering, Associate Professor
Dzoev Alan Eduardovich,
North-Caucasian Mining and Metallurgical Institute
(State Technological University),
Vladikavkaz, Russian Federation

Abstract. This paper addresses the problem of detecting non-technical losses based on data automatically collected by digital metering devices and stored in advanced metering systems. An approach combining a gradient boosting ensemble model and SHAP-based analysis for prediction interpretation is proposed. The results demonstrate that SHAP improves model transparency and enables the formulation of well-grounded hypotheses regarding the nature of detected anomalies.

Keywords: non-technical losses, advanced metering systems, machine learning, CatBoost, model interpretability, SHAP, data analysis.

Проблема неучтённого потребления электроэнергии сохраняет высокую актуальность для распределительных сетевых организаций, поскольку

коммерческие потери, обусловленные вмешательством в работу приборов учёта, искажением телеметрических данных и иными формами несанкционированного отбора мощности, приводят к существенным финансовым издержкам и снижению качества балансовых и прогностических расчётов [1]. Развитие автоматизированных систем учёта электроэнергии (АИИС КУЭ), обеспечивающих централизованный сбор, передачу и хранение детализированных профилей нагрузки с цифровых приборов учёта, создало технологическую основу для перехода от выборочных проверок к непрерывному аналитическому контролю [2]. В этих условиях методы машинного обучения рассматриваются как инструмент масштабируемого анализа потоков измерительной информации и выявления отклонений, не фиксируемых традиционными регламентными процедурами [3]. Вместе с тем эксплуатационное внедрение таких моделей ограничивается их недостаточной интерпретируемостью: формальный результат классификации в виде бинарной метки не обеспечивает инспектора достаточной аргументацией для инициирования выездной проверки [4]. В работе рассматривается подход к интерпретации прогнозов ансамблевой модели на основе аддитивного анализа Шепли, позволяющий количественно оценить вклад отдельных факторов в формирование решения и соотнести его с физическими закономерностями энергопотребления.

Исходные данные сформированы на основе измерений, автоматически собранных цифровыми приборами учёта и агрегированных в АИИС КУЭ. Рассматриваемая выборка включает 200 лицевого счетов с суточной дискретностью за период 90 календарных дней, что соответствует 18 000 наблюдений. В течение первых 60 дней все потребители функционировали в штатном режиме; на заключительном интервале у 40 объектов были инициированы сценарии неучтённого потребления различной природы, сформировавшие 1 200 целевых событий класса «аномалия». Таким образом, в тестовом сегменте доля аномальных наблюдений составила 20 %, что отражает типичное соотношение классов в задачах ретроспективного анализа. Для каждого наблюдения использовались как первичные измерения (общее суточное, дневное и ночное потребление), так и производные характеристики, формируемые автоматически в рамках процедур предобработки в аналитическом контуре АИИС КУЭ: отношение дневного потребления к ночному, календарные признаки, скользящие статистики за предшествующий период, лаговые значения, а также нормированное отклонение от типового профиля, определяемого в рамках кластеризации потребителей по уровню базового энергопотребления. Сформированный вектор признаков отражает как текущие режимы нагрузки, так и их динамику, что является существенным для выявления скрытых аномалий.

В качестве базовой модели использован алгоритм градиентного бустинга над решающими деревьями, реализованный в библиотеке CatBoost, что обусловлено его устойчивостью к разнородным признакам, способностью эффективно обрабатывать табличные данные без сложной предварительной нормализации и эффективности в ряде исследований, посвященных электроэнергетике [5, 6]. Обучение проводилось на историческом интервале, предшествующем возникновению нарушений, тогда как тестирование – на последующем временном отрезке, что воспроизводит условия реальной эксплуатации системы мониторинга.

При выбранных гиперпараметрах (200 итераций, глубина деревьев 6, темп обучения 0,05, L2-регуляризация 3) модель продемонстрировала высокое качество классификации: Accuracy = 0,9769, Precision = 0,9812, Recall = 0,6624, F1-score = 0,7909, ROC-AUC = 0,9691. Наблюдаемое соотношение точности и полноты указывает на консервативный характер классификатора, минимизирующий количество ложноположительных срабатываний, что соответствует требованиям эксплуатационной практики, где стоимость необоснованных проверок является значимой.

Для интерпретации полученных прогнозов применён алгоритм Tree SHAP, адаптированный для ансамблей решающих деревьев и обеспечивающий аддитивное разложение предсказания модели на вклады отдельных признаков [7]. На рисунке 1 приведена глобальная важность признаков, выраженная средним абсолютным значением Шепли (средним вкладом признака в выход модели).

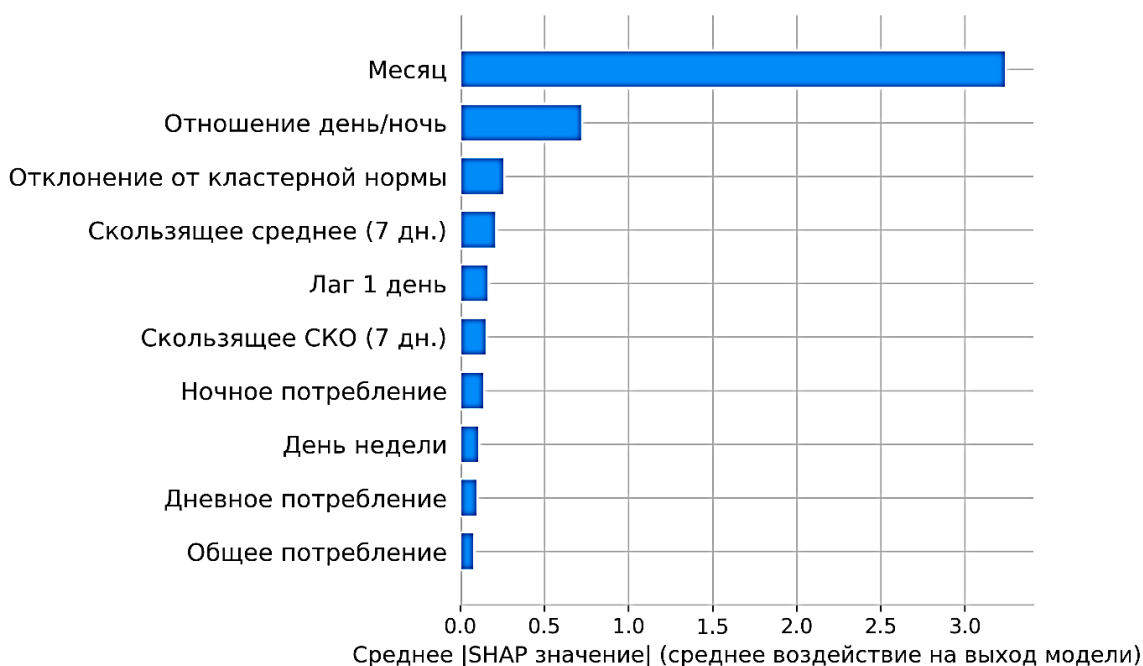


Рисунок 1. Глобальная важность признаков (среднее абсолютное значение Шепли)

Глобальный анализ важности, основанный на среднем абсолютном значении Шепли, показывает доминирование календарного признака, отражающего принадлежность наблюдения к определённому месяцу. Данный результат обусловлен структурой экспериментальной выборки, в которой аномалии сконцентрированы на заключительном временном интервале, и свидетельствует о корректном учёте моделью временной зависимости данных. Вместе с тем с прикладной точки зрения наибольший интерес представляет следующий по значимости фактор – отношение дневного и ночного потребления. Его высокая информативность согласуется с инженерной интерпретацией процессов несанкционированного потребления, при которых нагрузка смещается в ночные часы вследствие обхода приборов учёта или подключения дополнительного оборудования. Более детальную картину даёт распределение Шепли-значений для каждого признака, представленное на рисунке 2.

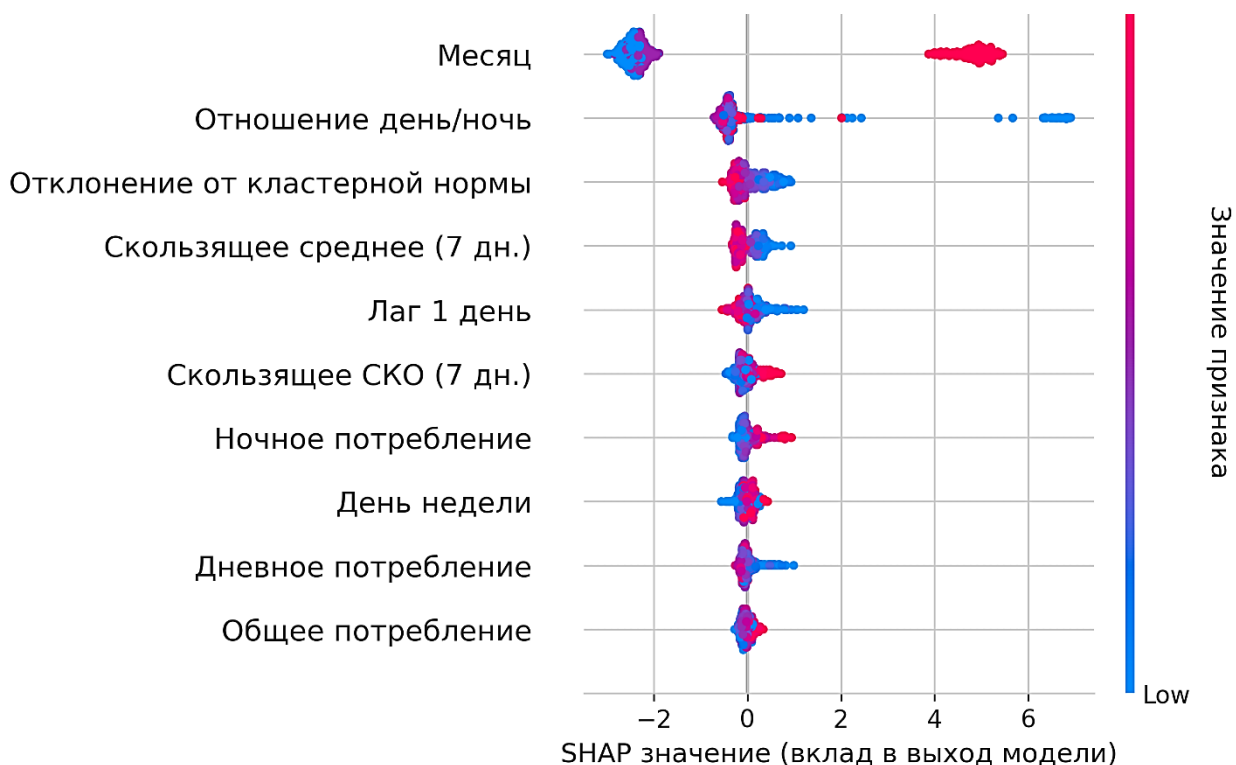


Рисунок 2. Распределение значений Шепли по признакам

Анализ распределений Шепли-значений по отдельным наблюдениям позволяет уточнить характер влияния признаков на итоговое решение. Для календарного признака наблюдается чёткое разделение вкладов по знаку, соответствующее границе между обучающим и тестовым интервалами. Для отношения дневного и ночного потребления отрицательные значения, отражающие относительное увеличение ночной нагрузки, формируют положительный вклад в вероятность аномалии, тогда как преобладание дневного потребления ассоциируется со снижением этой вероятности. Признаки, описывающие локальную динамику (скользящие средние, стандартное отклонение, лаговые значения), вносят менее выраженный, но согласованный вклад, усиливая или ослабляя итоговый прогноз в зависимости от степени отклонения текущего режима от типового профиля. Такая структура вкладов указывает на то, что модель использует комбинацию статических и динамических характеристик, формируя решение на основе совокупности факторов.

Полученные результаты демонстрируют, что интеграция методов интерпретации в контур анализа данных АИИС КУЭ позволяет перейти от формального выявления аномалий к содержательной диагностике возможных нарушений, что повышает устойчивость работы электроэнергетических систем [8]. Аддитивное представление прогноза в терминах вкладов признаков обеспечивает прозрачность работы модели и формирует для инспектора обоснованные гипотезы, подлежащие проверке, в частности, связанные с атипичным распределением нагрузки по зонам суток. В совокупности с автоматизированным сбором и хранением измерений, а также с возможностью визуализации профилей потребления, это создаёт основу для построения интеллектуальной системы поддержки принятия решений, ориентированной на снижение коммерческих потерь и повышение эффективности контрольных мероприятий.

Список литературы:

1. Луковников, Д. В. Неучтенное и безучетное потребление электроэнергии / Д. В. Луковников // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т. 1. – С. 43–47.
2. Виноградов, А. В. Перспективы развития систем учета электроэнергии / А. В. Виноградов, М. В. Бородин, Д. Ю. Юров // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2012. – № 2. – С. 10–15.
3. Использование искусственного интеллекта в виде нейронных сетей для выявления безучетного потребления / И. Ш. Фардиев, Т. Р. Курбангалиев, Р. Р. Усманов, Ш. Р. Яхин // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 6 (81). – С. 28–31.
4. Новиков, В. Д. Прогнозирование потребительской активности с использованием методов машинного обучения / В. Д. Новиков, Р. М. Хамитов // Транспорт и информационные технологии. – 2024. – Т. 14, № 1. – С. 205–214.
5. Прогнозирование потребления электроэнергии предприятиями народнохозяйственного комплекса в условиях неполноты информации / И. Д. Моргоев, А. Э. Дзгоев, Р. В. Ключев, А. Д. Моргоева // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2022. – № 3 (107). – С. 9–20. – DOI: 10.35330/1991-6639-2022-3-107-9-20.
6. Разработка гибридной модели прогнозирования потребления электрической энергии для горно-металлургического предприятия / С. А. Вялкова, А. Д. Моргоева, О. А. Гаврина // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14, № 3 (53). – С. 486–493. – DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-486-493.
7. Lundberg, S. M. A unified approach to interpreting model predictions / S. M. Lundberg, S.-I. Lee // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017. – Vol. 30. – P. 4765–4774. – URL: <https://arxiv.org/abs/1705.07874> (дата обращения: 24.04.2026).
8. Соколов, А. А. Алгоритмы управления устойчивостью системы «предприятие горно-металлургического комплекса – внешняя среда» / А. А. Соколов, А. С. Мирошников, Е. А. Соколова // Горный журнал. – 2016. – № 12. – С. 83–86. – DOI 10.17580/gzh.2016.12.17.

Примечание. При написании статьи были применены технологии искусственного интеллекта.

© Моргоев И. Д., 2026

АВТОНОМНЫЙ КОМПЛЕКС СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ВОДНОГО ОКИСЛЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОТХОДОВ

канд. техн. наук, доцент **Хлыновский Алексей Михайлович**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Для сохранения экологического равновесия при ведении хозяйственной деятельности необходимо разработать и подготовить арсенал средств, направленных на максимально бережное отношение к окружающей среде. Предлагается высокоэффективная экологически безопасная технология утилизации сельскохозяйственных и бытовых органических отходов и определяются технические параметры автономной установки, реализующей метод сверхкритического водного окисления. Предлагаемое решение позволит снизить затраты на утилизацию отходов и получить полезную тепловую энергию.

Ключевые слова: сверхкритическая вода, органические отходы, утилизация отходов птицефабрик, осадок сточных вод.

AUTONOMOUS COMPLEX OF SUPERCRITICAL WATER OXIDATION OF AGRICULTURAL WASTES

PhD in Engineering, Associate Professor **Khlynovsky Alexey Mikhailovich**,
Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. To maintain ecological balance in the conduct of economic activities, it is necessary to develop and prepare an arsenal of means aimed at the most careful attitude to the environment. A highly efficient environmentally safe technology for the disposal of agricultural and household organic waste is proposed, and the technical parameters of an autonomous installation that implements the method of supercritical water oxidation are determined. The proposed solution allows reducing waste disposal costs and obtaining useful thermal energy.

Keywords: supercritical water, organic waste, poultry waste disposal, sewage sludge.

Введение

Известно, что вовлекаемые в процесс промышленного производства сырьевые ресурсы в сельском хозяйстве полезно используются лишь от 2 до 10 процентов, а остальные вещества, так или иначе, отправляются в отходы [1]. При интенсивном развитии промышленного животноводства и птицеводства неизбежно возникают проблемы утилизации органических отходов. Для примера: по статистическим данным в Ленинградской области ежедневно образуется свыше

2000 тонн отходов от птицефабрик. Применение методов сжигания и газификации при нормальном давлении можно обеспечить снижение объемов накопленного отхода. Однако из-за высокой температуры процессов образуются и попадают в окружающую среду такие опасные соединения как диоксины, полициклические ароматические углеводороды, окислы азота, серы, а также парниковые газы CO_2 , CH_4 , NH_3 . Кроме того, высокое начальное содержание воды в помете и в осадке сточных вод требует значительных энергозатрат на сушку исходного материала при реализации методов сжигания и газификации.

Постановка задачи

Необходима разработка и внедрение инновационных решений, обеспечивающих высокоэффективную и экономичную технологию утилизацию органических отходов, что имеет важное народнохозяйственное значение. Важное значение приобретают вопросы охраны окружающей природной среды, повышения безопасности труда обслуживающего персонала, сохранения здоровья населения.

Особенно актуальным является вопросы производства электрической и тепловой энергии с помощью автономных мобильных комплексов, где в качестве топлива должны быть использованы органические отходы. Это обстоятельство позволяет получить высокий синергетический эффект: с одной стороны, вырабатывать полезную тепловую энергию, а с другой – уменьшить экологический ущерб путем сокращения площадей, занятые под полигоны хранения отходов [2].

Предлагаемое решение:

Метод сверхкритического водного окисления (СКВО) в качестве основы технологии безотходной утилизации органических отходов и с параметрами процесса $t_{\text{кр}} = 374\text{ }^\circ\text{C}$, $P_{\text{кр}} = 22,1\text{ МПа}$ [3].

Преимущества метода:

- разлагается не менее 99,99 % органических соединений. Исходный материал превращаются в экологически безвредные H_2O и CO_2 ;
- отсутствуют выбросы в окружающую среду (реакция протекает в замкнутом объеме);
- обеспечивается автономность работы установки – продукт реакции (флюид) используется как рабочее тело в энергопроизводящем оборудовании – паровой или паровинтовой турбине.

Как известно, вода в суб- и сверхкритическом состоянии является универсальной средой для осуществления химических реакций [3]. Диаграмма фазовых состояний воды приведена на рисунке 1.

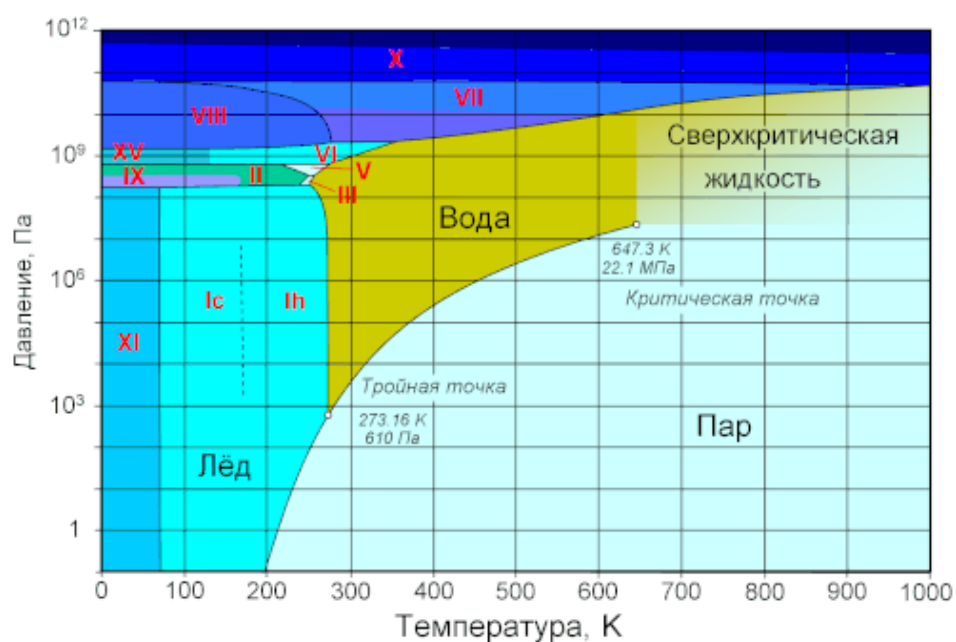


Рисунок 1. Диаграмма фазовых состояний воды

Химические и теплотехнические характеристики составов различного рода органических отходов, в том числе осадков сточных вод, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика отходов

Вид отходов	Влажность, %	Углерод, % С	Водород, % H ₂	Кислород, % O ₂	Азот, % N ₂	Зола, % А	Удельная теплота сгорания на сухую основу Q, кДж/кг
Куриный помет	15-20 (75-80)	43-45	5-6	35-37	4,0-5,0		18000-22000
Пищевые отходы	30,0-40,0	36,0-38,0	5,8	16,0	0,7	1,9	18000-22000
ТКО	15-30	43,0-48,0	-6-8	-28-36		10-20	14000-20000
Осадки сточных вод	15-20 (80-90)	54,0-60,0	7,0-10,0	24-31	4,0-10,0	18,0-24,0	16000-22000

Преимущество флюидов перед жидкостями при использовании их в качестве растворителей определяется их уникальными свойствами:

- сочетание свойств газов (высокий коэффициент диффузии, низкая вязкость) и жидкостей (высокая растворяющая способность);
- быстрый массоперенос благодаря высокому коэффициенту диффузии и низкой вязкости.

Кроме того, по сравнению с традиционными способами (сжиганием и пиролизом) отметим следующие достоинства метода: отсутствуют вредные выбросы в атмосферу, реакция окисления протекает при относительно низкой температуре: 400⁰С и отсутствует необходимость предварительной сушки исходного материала.

Техническое решение

Условием осуществления сверхкритического водного окисления является подача в реактор водной суспензии утилизируемого материала и окислителя. При содержании в исходной реакционной смеси органических веществ (10-25 %) процесс сверхкритического водного окисления протекает с выделением 10-20 МДж/кг тепла: для сравнения, тепловыделение при сжигании бензина – 40 МДж/кг [4].

Сравнение различных методов утилизации отходов показывает несомненное экономическое преимущество метода СКВО по величине затрат на разложение 1 кг вещества.

Принципиальная технологическая схема установки приведена на рисунке 2.

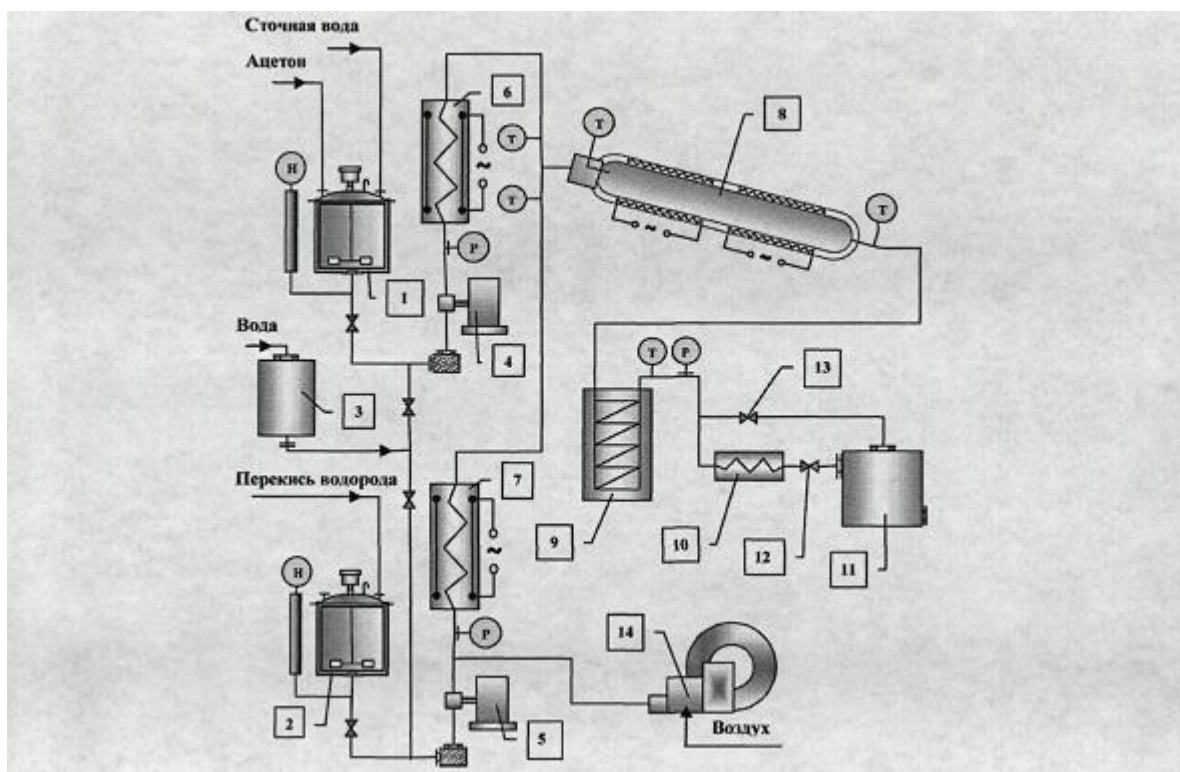


Рисунок 2. Принципиальная технологическая схема установки окисления жидких органических отходов, разработана в ФНПЦ «Алтай», г. Бийск [5]:

1 – расходная емкость для сточной воды с ацетоном; 2 – расходная емкость для перекиси водорода; 3 – резервная емкость для воды; 4, 5 – насосы-дозаторы; 6, 7 – теплообменники; 8 – реактор; 9 – холодильник; 10 – устройство сброса давления; 11 – сборник очищенных стоков; 12, 13 – регулирующие вентили; 14 – компрессор

Наиболее оптимальным вариантом размещения оборудования автономной мобильной установки для утилизации органики будет вариант применения стандартных морских контейнеров. Технология монтажа оборудования в морских контейнерах отработана фирмой ООО МИК «АкваСервис», г. Санкт-Петербург [6].

Выводы

По совокупности полезных свойств метод сверхкритического водного окисления органических веществ имеет ряд несомненных преимуществ:

- низкую температуру реакции;
- одностадийность процесса;
- отсутствие процесса образования высокотоксичных диоксинов.

Реактор автономной установки для утилизации органических отходов производительностью до 20 тонн в сутки (1250 кг\час) должен иметь объем до 50 литров.

Список литературы:

1. Утилизация навоза / помета на животноводческих фермах для обеспечения экологической безопасности территории, наземных и подземных водных объектов в Ленинградской области: обзор наилучших технологий / [В. И. Могилевцев и др.]; под ред. В. И. Могилевцева. – СПб., 2013. – 237 с.
2. Разработка автономного комплекса утилизации органических отходов / А. М. Хлыновский, Т. Ю. Короткова, В. В. Пеленко, А. А. Верхоланцев // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2019. – № 3 (100). – С. 170–179.
3. Галкин, А. А. Вода в суб- и сверхкритическом состояниях – универсальная среда для осуществления химических реакций / А. А. Галкин, В. В. Лунин // Успехи химии. – 2005. – Т. 74, № 1. – С. 24–40.
4. Иконников, В. К. Применение метода сверхкритического водного окисления в технологиях уничтожения вредных веществ 1-го и 2-го класса опасности / В. К. Иконников, П. А. Егоянц // Физико-химические аспекты предельных состояний и структурных превращений в сплошных средах, материалах и технических системах: [сборник статей] / Санкт-Петербургский научный центр РАН; под общей редакцией Ю. В. Петрова. – Санкт-Петербург: Политехника, 2018. – С. 113–121.
5. Иконников, В. К. Технология переработки птичьего помёта, функционирующая на основе процессов сушки, газификации и сжигания птичьего помёта с получением электрической и тепловой энергии, а также минеральных удобрений / В. К. Иконников, В. И. Паршуков // Тезисы докладов [научной] конференции (Санкт-Петербург, 15 мая 2019 г.). – Санкт-Петербург: [б. и.], 2019.
6. Микенин, П. Е. Исследование влияния сверхкритических растворителей в реакциях окисления и синтеза органических соединений: специальность 02.00.15 «Катализ»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Микенин Павел Евгеньевич; Институт катализа имени Г. К. Борескова СО РАН. – Новосибирск, 2008. – 16 с.
6. Автономные модульные энерготехнологические комплексы на основе переработки сельскохозяйственных отходов методом газификации / В. К. Иконников, В. М. Горьков, В. И. Паршуков [и др.] // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2018. – Вып. 98. – С. 34–43.

© Хлыновский, А. М. 2026

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ХРАНЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ПРОИЗВОДСТВА ЭТИЛЕНА

студент **Ломоносов Максим Дмитриевич**,
науч. руководитель: канд. техн. наук **Благодарный Николай Семенович**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологий и энергетики,
Санкт-Петербург, Российский Федерация

Аннотация. В статье представлено описание разработки цифрового двойника технологического процесса хранения остаточных продуктов производства этилена. Разработаны математические уравнения, описывающие технологический процесс, реализованные в программном коде CodeSys 3.5 patch 14. Визуализация процесса выполнена внутри той же программы благодаря встроенной функции «visualization». Математическое моделирование выполнено в среде Matlab/Simulink.

Ключевые слова: математическая модель, моделирование, Matlab/Simulink, пиролизная смола, полимеризация.

DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN FOR THE PROCESS OF STORING RESIDUAL PRODUCTS FROM ETHYLENE PRODUCTION

Student **Lomonosov Maxim Dmitrievich**,
Academic Advisor: PhD in Engineering
Blagodarnyy Nicolay Semenovich,
St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article presents a description of the development of a digital twin of the technological process of storing residual products of ethylene production. Mathematical equations describing the technological process have been developed and implemented in the CodeSys 3.5 patch 14 software code. The process has been visualized within the same program using the built-in «visualization» function. Mathematical modeling has been performed using the Matlab/Simulink environment.

Keywords: mathematical model, simulation, Matlab/Simulink, pyrolysis resin, polymerization.

Введение и постановка задачи

Цифровой двойник (ЦД) – компьютерная динамическая модель реального объекта, характеристики которой максимально схожи с оригиналом. Цифровой двойник должен с высокой точностью имитировать технологические процессы

реальной установки и генерировать значения, идентичные показаниям всех её датчиков, а также предоставить оператору возможность локализовывать возникшие аварии теми способами, которые применимы в оригинальной установке.

Основная цель внедрения ЦД – дать обслуживающему персоналу возможность обучиться безаварийному управлению сложной системой, причем с упором на быстрый поиск неисправностей и оперативную стабилизацию технологического режима без риска реальной аварии. Помимо тренинга оперативного персонала установки, грамотно выстроенный ЦД служит наглядным пособием для понимания физико-химических основ процесса. Оператор начинает лучше видеть взаимосвязь параметров и понимать, как работает тот или иной контур регулирования, почему срабатывает та или иная защита.

В настоящем докладе рассматриваются вопросы разработки ЦД технологической установки хранения остаточных продуктов производства этилена ООО «Иркутский завод полимеров», блоки которой относятся к I категории взрывоопасности [1]. Цифровой двойник позволит создать виртуальную среду данной установки, где можно безопасно, многократно и с любым уровнем сложности отрабатывать нештатные ситуации, что невозможно исполнить на реальной установке. Упрощенная мнемосхема рассматриваемого объекта представлена на рисунке 1.

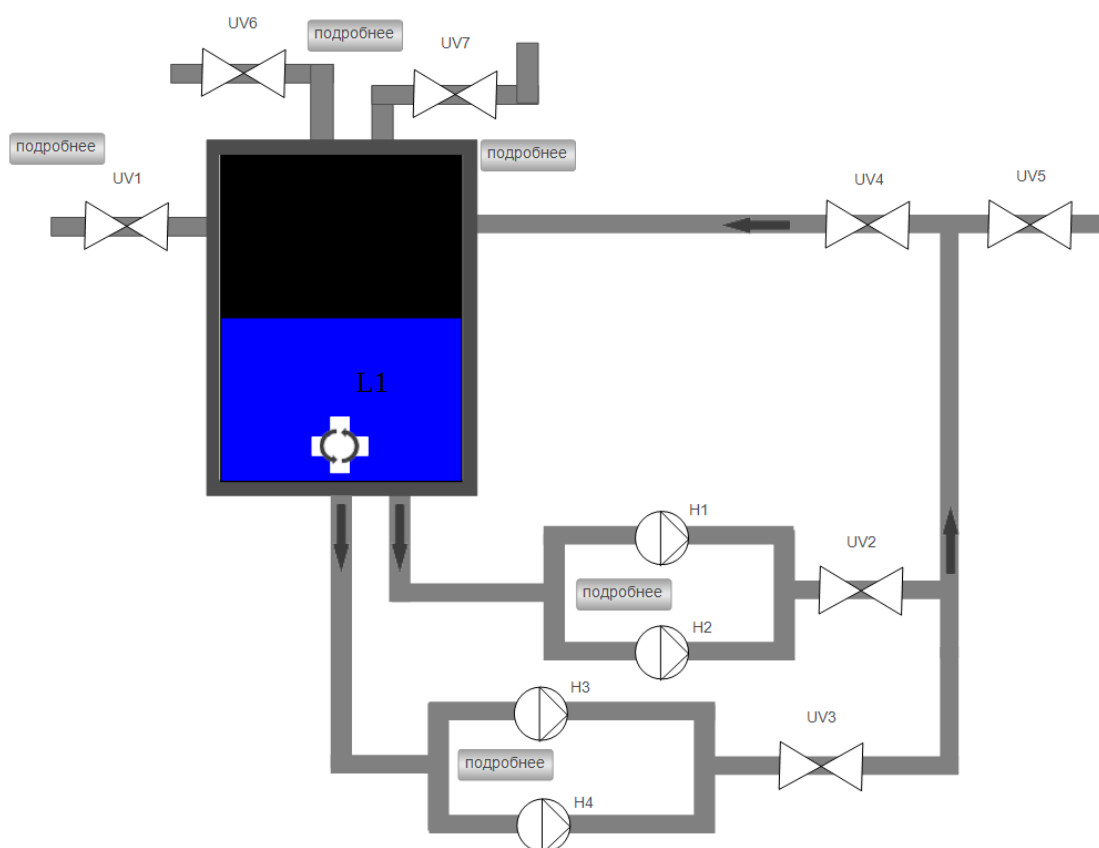


Рисунок 1. Упрощенная мнемосхема установки хранения остаточных продуктов производства этилена

Описание упрощенной мнемосхемы установки

Объектом моделирования является фрагмент реальной технологической установки, включающий ёмкость L1 с мешалкой для предотвращения

полимеризации продукта в емкости, для хранения пиролизной смолы, систему создания и поддержания азотной подушки, реализованную при помощи регулирующих клапанов UV6 и UV7, а также трубопроводную обвязку с запорно-регулирующей арматурой и группой циркуляционных насосов. Основное назначение установки – это приём остаточного продукта с производства этилена, хранение и откачка смолы в подключаемую цистерну по запросу, с поддержанием заданного давления в газовом пространстве ёмкости для исключения возможности образования взрывоопасной смеси.

Откачка жидкости из ёмкости производится группой насосов, состоящей из основного и резервного механизмов, включённых параллельно. Жидкость забирается из нижней части резервуара через всасывающий трубопровод, поступает на вход работающего насоса, где получает необходимый напор, и далее через напорный трубопровод направляется на следующую технологическую стадию. На напорной линии каждого насоса установлена регулирующая задвижка. Благодаря параллельному включению насосов обеспечивается резервирование и возможность увеличения производительности. Также в системе предусмотрена циркуляция жидкости в системе, реализована она при помощи второй группы насосов, включённых параллельно, предназначена для решения проблемы полимеризации остаточного продукта в трубопроводе.

Газовая подушка поддерживается системой подачи и сброса азота. Подача азота в ёмкость осуществляется от внешней магистрали через регулирующий клапан UV6. Сброс избыточного давления происходит через регулирующий клапан UV7, соединяющий газовое пространство с атмосферой.

Описание технологического процесса

По приточному трубопроводу из технологической установки (производство этилена) в емкость L1 поступает целевой продукт – пиролизная смола. Расход продукта регулируется запорно-регулирующим органом (задвижкой) UV1 и в номинальном режиме составляет 5 м³/ч. Технологическим регламентом установлена номинальная температура продукта 83 °С с допустимыми пределами 78–88 °С. Емкость оснащена датчиками давления, температуры и уровня. Допустимое избыточное давление в емкости, согласно регламенту, составляет 0,18–0,22 МПа. Сигнал от датчика уровня обеспечивает контроль наполнения емкости. Нормальное значение уровня продукта поддерживается в диапазоне 20–80 % от максимального. При выходе любого из контролируемых параметров (давление, температура, уровень) за допустимые пределы автоматически срабатывает предупредительная сигнализация. Для предотвращения полимеризации смолы в трубопроводах системы предусмотрена циркуляция продукта. Циркуляция обеспечивается группой из двух параллельно включённых насосов Н1 и Н2. Номинальная производительность каждого насоса составляет 5 м³/ч при напоре 15 м. Производительность группы насосов регулируется с помощью частотного преобразователя, что позволяет плавно изменять суммарный расход в зависимости от температуры окружающей среды и температуры перекачиваемого продукта. Измерение температуры продукта осуществляется в конце циркуляционного трубопровода перед возвратом потока в емкость. Кроме того, в составе системы имеется группа насосов Н3 и Н4, предназначенная для откачки продукта из емкости в цистерну по мере накопления. Номинальная производительность каждого из насосов составляет 25 м³/ч при напоре 25 м. Расход продукта на нагнетании регулируется задвижками UV3 и UV5. Запуск данной группы осуществляется только при наличии внешнего потребителя (приемной емкости), подключенного к откачиваемому трубопроводу.

Платформа для создания цифрового двойника

В качестве среды разработки цифрового двойника выбрана программа CODESYS 3.5. Данный выбор обусловлен следующими техническими и эксплуатационными факторами:

1. Относительно низкий порог освоения, что сокращает время подготовки разработчика.

2. Возможность реализации обеих ключевых составляющих проекта – математической модели и системы визуализации – в единой интегрированной среде, что исключает необходимость стыковки разнородного программного обеспечения и упрощает отладку.

CODESYS 3.5 позволяет гибко настраивать права доступа к модели и её визуальной оболочке. Это даёт возможность реализовать двухуровневый сценарий обучения «преподаватель – студент (оператор)». В программном коде цифрового двойника заложены математическая модель технологической системы, алгоритмы сигнализации и набор аварийных сценариев. Пользователь с правами «преподаватель» инициирует эти аварийные ситуации для проверки готовности студентов (операторов) к оперативному принятию решений в условиях, приближенных к реальным. Корректное построение цифрового двойника в среде CODESYS 3.5 позволяет эффективно подготавливать операторов к работе на реальном технологическом объекте без рисков, связанных с отработкой аварийных режимов на действующем оборудовании.

Математическое описание модели

В данном разделе представлены уравнения, положенные в основу компьютерной модели технологической установки. Модель построена с учётом законов сохранения массы, термодинамических соотношений и гидравлических характеристик трубопроводов и насосного оборудования.

Накопление жидкости в ёмкости описывается дифференциальным уравнением баланса:

$$\frac{dm}{dt} = F_1 - F_{out1}, \quad (1)$$

m – масса жидкости в ёмкости, кг;

F_1 – массовый расход жидкости на входе в ёмкость (приток), кг/с;

F_{out1} – массовый расход жидкости на выходе из ёмкости (отток через насосную группу), кг/с.

Текущий уровень жидкости в ёмкости L и объём жидкости V связаны с массой соотношениями:

$$L = \frac{m}{\rho S}, \quad V = \frac{m}{\rho}, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости, [кг/м³], S – площадь основания ёмкости, м².

Накопление азота в ёмкости описывается дифференциальным уравнением баланса:

$$\frac{dm_a}{dt} = F_3 - F_4, \quad (3)$$

где m_a – масса жидкости в ёмкости, кг;

F_3 – массовый расход азота на входе в ёмкость, кг/с;

F_4 – массовый расход азота на выходе из ёмкости, кг/с.

Давление газовой подушки в емкости определяется из формулы Клайперона-Менделеева:

$$P_0 = \frac{m_a RT}{V_a}. \quad (4)$$

R – удельная газовая постоянная для азота;

T – абсолютная температура в ёмкости;

V_a – объём газовой подушки, м³, вычисляемый как разность полного объёма ёмкости и объёма жидкости:

$$V_a = V_{\max} - V, \quad V_{\max} = 100 \text{ м}^3. \quad (5)$$

Переменные, участвующие в математических уравнениях, описывающих работу насосов:

$F_{\text{сум}}$ – расход;

$P_{\text{низ}}$ – давление низа, равное сумме давления, создаваемого азотной подушкой и давления, создаваемого столбом жидкости;

P_0 – давление верха бочки;

P_n – давление нагнетания, давление после насоса;

P_v – давление всаса, на участке трубы до насоса;

P_a – давление внутри дополнительной цистерны;

D – диаметр трубы;

L – длина трубы;

ρ – плотность используемой жидкости;

g – ускорение свободного падения;

k_{sn} – коэффициент проходимости трубопровода нагнетания;

k_{sv} – коэффициент проходимости трубопровода всаса;

r – коэффициент проходимости насосов;

UV – степень открытия клапана (0-1);

H – напор, развиваемый насосом;

n – относительная скорость вращения.

По второму закону Ньютона запишем уравнения для напорного участка трубы:

$$F = m \times a, \quad (6)$$

где m – масса, [кг], a – ускорение [м/с²], F – сила, [Н].

Авторы статьи [2] находят потери напора из-за трения определяются по формуле Дарси – Вейсбаха, тогда, учитывая это, получим:

$$\rho \times V_0 \times \frac{dU_x}{dt} = (P_n - P_a) \times A - k_0 \times Q^2. \quad (7)$$

где ρ – плотность жидкости [кг/м^3], V_0 – объем жидкости [м^3], U_x – скорость жидкости в трубе [м/с], A – площадь сечения трубы [м^2], Q – объемный расход жидкости [$\text{м}^3/\text{с}$].

Учитывая, что скорость движения жидкости можно представить как отношение объемного расхода к площади сечения, а объем жидкости в трубе как произведение площади сечения на длину трубы, формулу (7) можно записать в виде:

$$\frac{\rho \times A \times L}{A} \times \frac{dQ}{dt} = (P_n - P_a) \times A - k_0 \times Q^2. \quad (8)$$

где L – длина напорного трубопровода.

В модели используется функция, для описания напора для насосов, имеющая вид: $H(F)$. Тогда формула, связывающая давление, напор и расход:

$$\rho g H(F) = P_n - P_g. \quad (9)$$

Результаты проделанной работы

По итогам выполненной работы разработан прототип математической модели технологического процесса хранения остаточных продуктов, реализованный в интегрированной среде CODESYS 3.5, а также создано главное окно визуализации (рис. 1), обеспечивающее операторский интерфейс для управления и контроля; на текущем этапе реализована возможность управления обеими группами насосов (циркуляционной и откачивающей), просмотра кривых их разгона при пуске, фиксации текущего расхода и его плавного регулирования, а также непрерывного мониторинга уровня заполнения ёмкости, давления в ёмкости (азотная подушка) и давления на различных участках трубопровода; дополнительно в модель интегрирован автоматический регулятор давления азотной подушки, поддерживающий заданное значение избыточного давления. В качестве дальнейшего развития запланировано включение уравнения теплового баланса для реализации частотного регулирования расхода циркуляционной группы насосов в зависимости от температуры продукта и окружающей среды, а также создание дополнительных окон визуализации, обеспечивающих реализацию сценария обучения по схеме «преподаватель – студент (оператор)» для отработки аварийных ситуаций и проверки готовности персонала к действиям на реальном объекте.

Список литературы:

1. Приказ Ростехнадзора от 15.12.2020 № 533 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» (вместе с «Федеральными нормами и правилами...»). – Текст: электронный // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012250048> (дата обращения: 25.04.2026).
2. Pipe Flow Analysis with Matlab Gerald Recktenwald. – URL: <https://web.cecs.pdx.edu/~gerry/class/ME322/notes/pdf/pipeFlowMATLABa1.pdf> January 28, 2007 (дата обращения: 25.04.2026).

ЭВОЛЮЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

канд. техн. наук **Сидельников Владимир Иванович**,
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий
и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена вопросу развития современных информационных управляющих систем на базе использования машинного обучения и больших объемов данных. Возможности извлечения новых знаний о процессах позволяют повысить степень понимания производственных процессов и повысить эффективность процессов управления на всех уровнях АСУ ТП, MES, ERP.

Ключевые слова: информационные управляющие системы, системы АСУ ТП, машинное обучение, искусственный интеллект, иерархия управления, эволюция.

EVOLUTION OF INFORMATION CONTROL SYSTEMS

PhD in Engineering **Sidelnikov Vladimir Ivanovich**,
St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the development of modern information control systems based on the use of machine learning and large amounts of data. The ability to gain new knowledge about processes allows you to increase your understanding of production processes and increase the efficiency of management processes at all levels of APCS, MES, ERP.

Keywords: information control systems, APCS systems, machine learning, artificial intelligence, control hierarchy, evolution.

Эволюция информационных управляющих систем неразрывно связана с развитием программных и аппаратных средств и возможностями получения новых данных, привела на настоящем этапе к широкому встраиванию средств искусственного интеллекта в эти системы.

Одновременно повысились требования к управлению технологическими процессами. При этом развитие информационных технологий позволяет достичь более высокого качества сбора и анализа производственной информации, а это приводит к повышению степени понимания производственных процессов и большей обоснованности принимаемых управленческих решений. Следует отметить, что именно большие данные и развитие науки о данных, а также технологии глубокого обучения сделали доступными знания, скрытые в больших

данных, и позволили расширить привлекательность и границы применимости искусственного интеллекта в производственных системах.

Это соответствует подходу, описывающему код пирамиды DIKIW (рис. 1), включающему иерархию ряда понятий (Data, information, Knowledge, intelligence, wisdom) – когнитивной зрелостью понятий [1].

Реализация алгоритмов управления в АСУ ТП была связана как с привлечением мощного математического аппарата, так и с развитием вычислительных возможностей. Применяемые на практике группы математических методов ассоциировались с соответствующей терминологией в разные периоды развития информационных управляющих систем [2]:

- оптимальное управление в 50-60-е годы XX века;
- кибернетика в 70-е;
- оптимизация производства и искусственный интеллект в 80-е;
- экспертные системы;
- нейронные сети;
- Big data и ML – в настоящее время.



Рисунок 1. Пирамида преобразований DIKIW

Следует отметить, что объединение различных математических методов под каким-то одним термином носит условный характер. Они могут относиться к нескольким научным направлениям и существует лишь условная классификация задач управления производством и математических методов их решения.

Возможная классификация информационно-управляющих систем (ИУС) по разделению основных задач по уровням принятия решений включает: полевой уровень, SCADA-системы, MES- уровень, уровень ERP.

Принцип разделения основан на использовании данных о работе системы более низкого уровня, которые используются в качестве входных данных для систем более высокого уровня, что соответствует базовому подходу к управлению объектом с обратной связью, по состоянию (рис. 2).

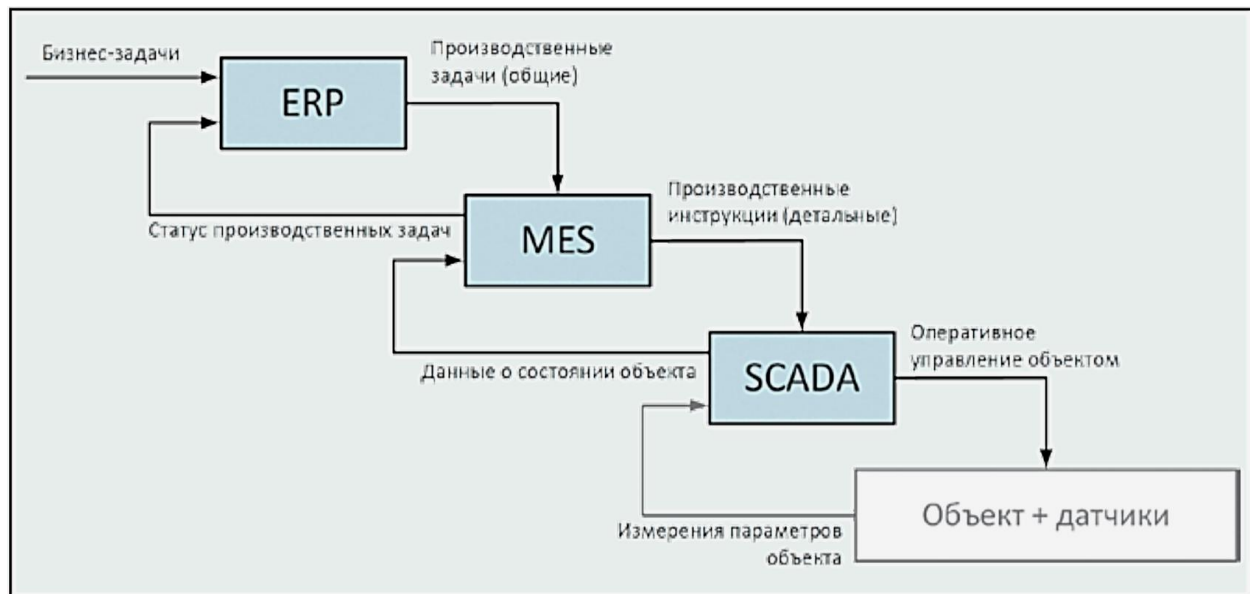


Рисунок 2. Иерархия информационного управления системы предприятия

Система уровня ERP (Enterprise Resource Planning) получает от человека стратегическую задачу – как правило, экономическую (снизить затраты, повысить прибыль, обеспечить объемы и качество производства) и разделяет ее на ряд частных производственных задач, поддающихся строгой формализации и алгоритмическому решению. Указанные частные задачи передаются в систему производственного уровня MES (Manufacturing Execution System), где содержатся алгоритмы их решения [3].

Информация о статусе выполнения частных задач уровня MES собирается и отправляется обратно на ERP-уровень, где используется для корректировки стратегических целей предприятия (замкнутая дискретная система управления).

Работа систем MES-уровня в информационном контуре с уровнем АСУ ТП (SCADA) осуществляется аналогичным образом: нижний уровень является поставщиком данных о состоянии системы, верхний уровень использует полученные данные для выработки инструкций и команд для управления объектами посредством интерфейсов SCADA-системы.

За последние годы управляющие алгоритмы контуров обратной связи технологических процессов и установок прошли путь от классических ПИД-регуляторов, обеспечивающих устойчивость и качество переходных процессов, до интеллектуальных систем, основанных на современных методах оптимизации и имеющих в своем составе модель объекта управления высокого порядка.

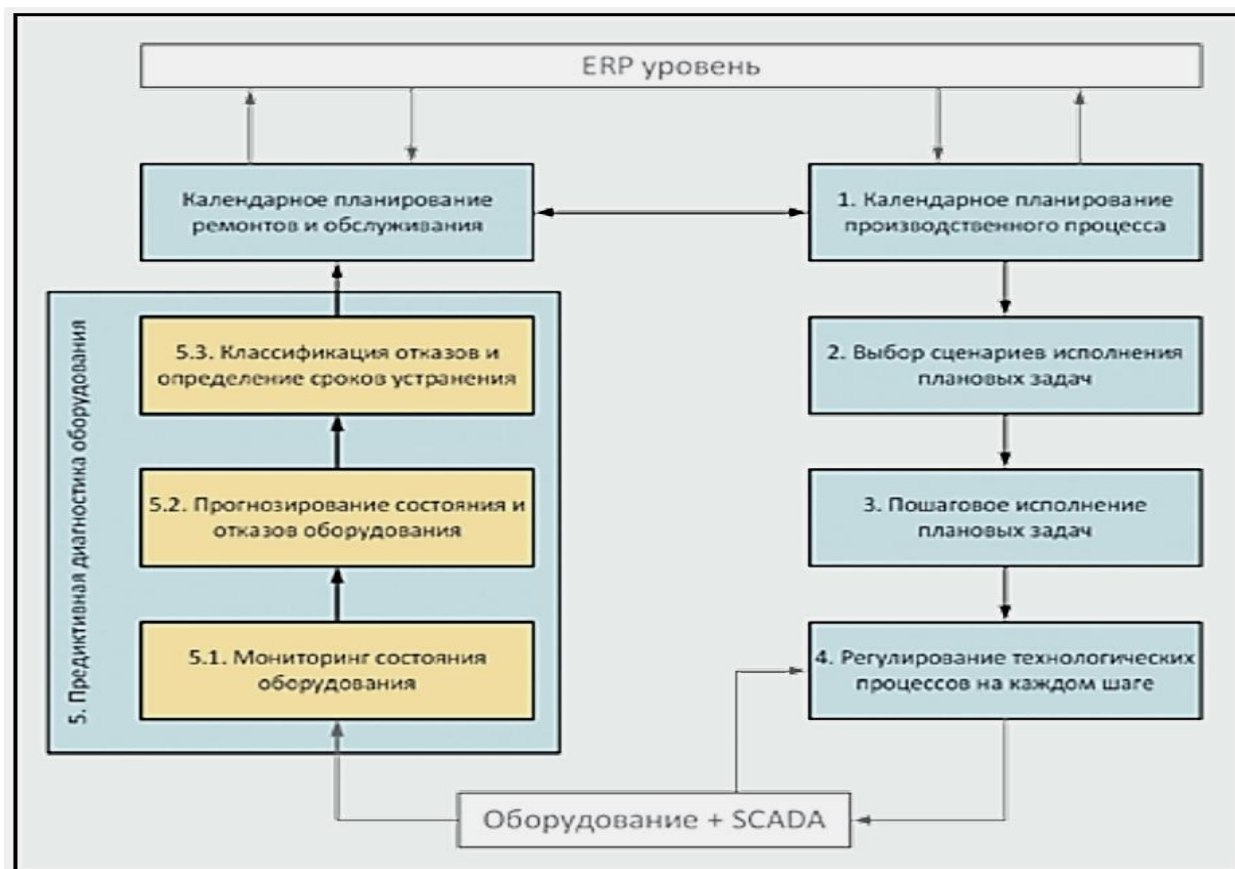


Рисунок 3. ИУС предприятия как многоконтурная система с обратной связью

Среди основных вычислительных технологий следует выделить подход model-predictive control (MPC), направленный на выработку будущих управляющих воздействий на объект с учетом изменения его динамики во времени и создание систем усовершенствованного управления. В классической постановке MPC опирается на решение уравнений динамики, то есть на физическую модель процесса, однако сам принцип прогнозного управления по модели давно распространился и на другие типы моделей, включая статистические. В качестве прогнозной модели вполне может выступать любая программная реализация зависимостей выходных параметров системы от управляющих сигналов. В настоящее время широкое распространение приобрели статистические и нейросетевые прогнозные модели, на базе которых реализованы такие технологии, как виртуальные датчики [4], экстраполирующие замеры лабораторных параметров между их поступлениями (рис. 4).



Рисунок 4. Пример работы виртуального датчика

В текущей постановке прогнозная модель используется как для расчета состояния объекта в будущие моменты времени, так и оценки состояния приборов измерения в текущие моменты.

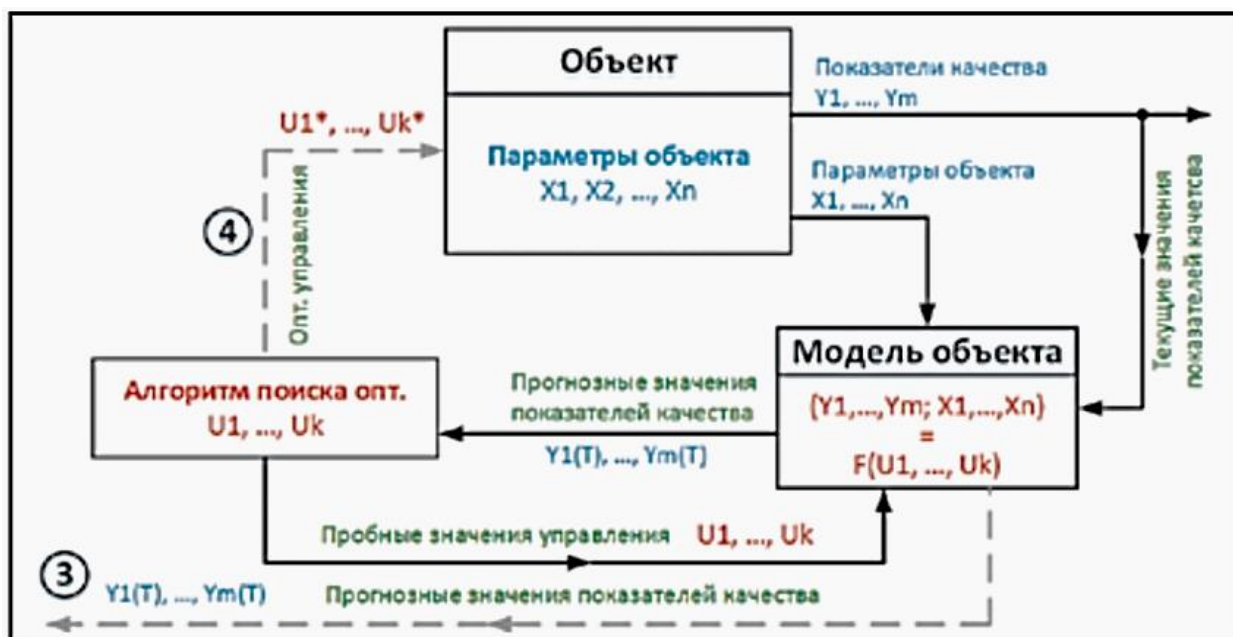


Рисунок 5. Схема прогнозирования и управления по модели объекта

Логичным продолжением задачи назначения плановых заданий непосредственно на производственные единицы являются процессы непрерывного управления их выполнением на основе сигналов обратной связи.

Структурная схема управления с интеллектуальным вычислителем представлена на рисунке 5. Использование вычислителя в обратной связи дает

возможность включать в контур управления прогнозные модели, создание которых обсуждалось выше, а также позволяет применять указанные модели для итеративного расчета требуемых управляющих воздействий, обеспечивающих наилучший в отношении какого-либо критерия результат. Данная постановка полностью повторяет задачу оптимального управления динамическим объектом по состоянию и является актуальной как в части создания самой модели объекта, так и в части синтеза алгоритмов оптимизации, осуществляющих поиск оптимального управляющего воздействия с использованием результатов моделирования.

Заключение. Таким образом, эволюция информационных управляющих систем связана с решением задач преобразования исходной информации каждого источника в знания, пригодные для решения задач различного уровня. Существующие методы, алгоритмы и технологии получения знаний на основе машинного обучения являются основанием для появления действительно интеллектуальных информационно-управляющих систем.

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. – DOI: <https://doi.org/10.17587/mau.21.282-293>.
2. Некрасов, И. Технологии искусственного интеллекта в задачах управления производством / И. Некрасов, Д. Лежнин // Рациональное управление предприятием. – 2019. – № 1/2. – С. 1–12. – URL: https://www.researchgate.net/publication/342673454_Tehnologii_Iskusstvennogo_intell_ekta_v_zadacah_upravlenia_proizvodstvom (дата обращения: 19.06.2026).
3. Сидельников, В. И. Предиктивная аналитика в производственных процессах / В. И. Сидельников, В. Г. Никешин // Энергетика и автоматизация в современном обществе: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей / под общей редакцией Т. Ю. Коротковой. – Санкт-Петербург: [б. и.], 2024. – С. 242–246. – ISBN 978-5-91646-373-6.
4. Сидельников, В. И. Опыт применения виртуальных датчиков в процессах производства бумаги / В. И. Сидельников, А. В. Кокшаров, В. Г. Никешин // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2023. – № 66 (92). – С. 118–121.

© Сидельников В. И., 2026

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАПОРА НА ТЕПЛООБМЕН В ОТОПИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗКАХ

канд. техн. наук, доцент **Гладышев Николай Николаевич**,
аспирант **Антошкин Илья Игоревич**,
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Снижение тепловой нагрузки при качественном регулировании её в системах теплоснабжения приводит к снижению температурного напора в отопительных приборах, что требует повышения их поверхности теплообмена. Так как поверхность теплообмена остаётся постоянной, то не вся подводимая теплота передаётся нагреваемому воздуху, и значительная её часть по обратному трубопроводу возвращается в источник теплоснабжения.

Ключевые слова: отопление, отопительные приборы, теплообмен, температурный напор, поверхность отопительных приборов.

THE EFFECT OF TEMPERATURE HEAD ON HEAT EXCHANGE IN HEATING DEVICES AT REDUCED THERMAL LOADS

PhD in Engineering, Associate Professor **Gladyshev Nikolay Nikolaevich**,
Postgraduate Student **Antoshkin Ilya Igorevich**,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The reduction of the thermal load with qualitative regulation of it in heat consumption systems leads to a decrease in the temperature head in heating devices, which requires an increase in their heat exchange surface. Since the heat exchange surface remains constant, not all of the supplied heat is transferred to the heated air, and a significant portion of it is returned to the heat supply source through the return pipeline.

Keywords: heating, heating devices, heat exchange, temperature difference, surface of heating devices.

Отопительные приборы систем отопления относятся к серии водовоздушных теплообменных аппаратов, в которых интенсивность теплообмена определяется воздушной стороной. Теплообмен с воздушной стороны классифицируется как естественный конвективный теплообмен, так как воздушный поток, омывающий поверхность теплообмена, перемещается за счёт разности плотностей тёплого и более холодного воздуха [1]. В этом случае коэффициент теплопередачи близок к коэффициенту теплоотдачи с воздушной

стороны α_B , который сохраняет своё значение при мало меняющихся параметрах воздушной среды:

$$k \approx \alpha_B \approx const. \quad (1)$$

Величиной, существенно влияющей на интенсивность теплообмена, является температурный напор, устанавливаемый между поверхностью отопительного прибора и нагреваемым воздухом.

Температура воздушной среды на некотором расстоянии от отопительного прибора, как показано на рисунке 1, имеет постоянное значение $t_{вп} = const$.

Для жилых помещений $t_{вп} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура стенки отопительного прибора близка к температуре воды, которая по мере движения по каналам снижает своё значение. При расчётных температурах греющей и нагреваемой среды среднелогарифмический температурный напор определяется по следующей формуле:

$$\Delta t_{срл} = \frac{\Delta \tau_6 - \Delta \tau_M}{\ln \frac{\Delta \tau_6}{\Delta \tau_M}}. \quad (2)$$

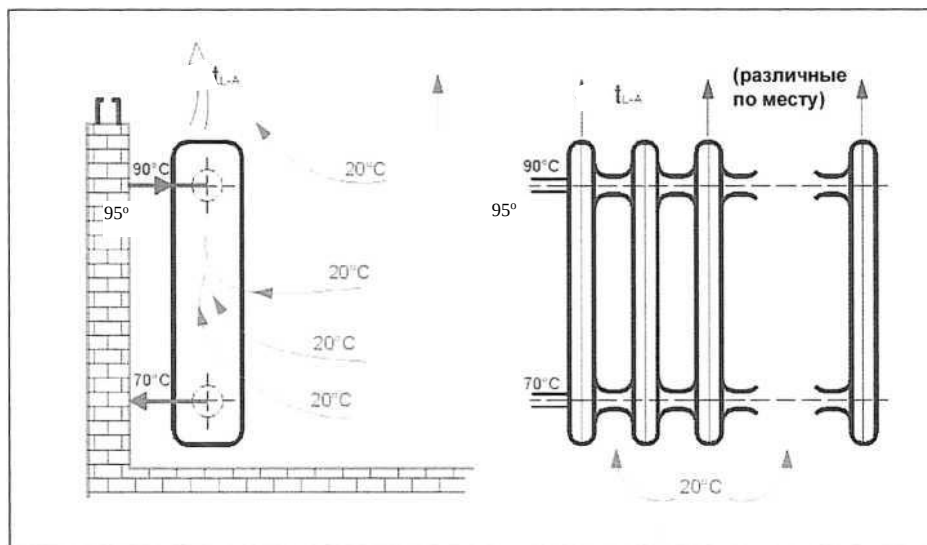


Рисунок 1. Отопительный прибор (радиатор) с указанием температуры теплоносителя и воздушной среды

При принятых температурах теплоносителя в отопительных приборах на входе $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выходе $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, допуская, что температура воздуха на стенке отопительного прибора изменяется незначительно, численное значение расчётного среднелогарифмического напора составит:

$$\Delta t_{срл} = \frac{\Delta \tau_6 - \Delta \tau_M}{\ln \frac{\Delta \tau_6}{\Delta \tau_M}} = \frac{75 - 50}{\ln \frac{75}{50}} = 61,7\text{ }^{\circ}\text{C},$$

где $\Delta \tau_6 = 95 - 20 = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta \tau_M = 70 - 20 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рассмотрим влияние температурного напора на поверхность теплообмена при снижении отопительной нагрузки, возникающей при повышении температуры наружного воздуха. Для оценки отопительной нагрузки при переменных температурах наружного воздуха воспользуемся графической зависимостью

величины относительной тепловой нагрузки $q_{от}$ от температуры наружного воздуха в характерных точках, представленной на рисунке 2.

$$q_{от} = \frac{Q_{отт}^n}{Q_{отп}^n} = f(t_n), \quad (3)$$

где $Q_{отт}^n$ – тепловая нагрузка при характерных температурах наружного воздуха $t_{ни}$, $t_{нп}$ и $t_{нр}$.

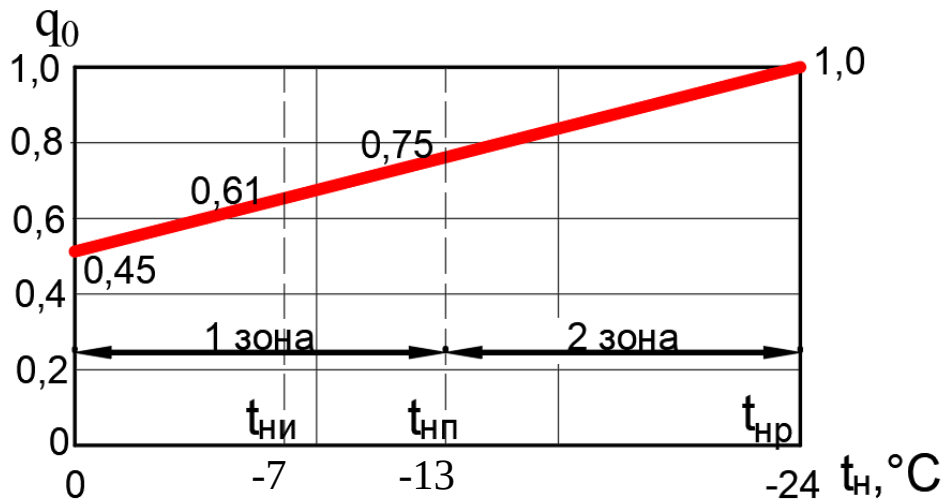


Рисунок 2. Относительная тепловая нагрузка в зависимости от температуры наружного воздуха

Определим зависимость требуемой площади отопительных приборов от величины температурного напора, возникающего при переменных температурах наружного воздуха в характерных точках ($t_{ни}$, $t_{нп}$ и $t_{нр}$), принимая в качестве исходной величины тепловую нагрузку $Q_{отп}^n = 100$ кВт. Расчётный расход сетевой воды для покрытия данной нагрузки, рассчитанный по уравнению (3), соответствует $G_{свр} = 0,298$ кг/с. Полученная зависимость $F_p = f(\Delta t_{ср})$ представлена на рисунке 3. Текущие значения температуры воды, циркулирующей в системе отопления, принимались по температурному графику 95/70 при соответствующих температурах наружного воздуха.

Как следует из представленных графиков, для передачи 100 кВт тепловой энергии при $t_{нр} = -24$ °С, средний температурный напор составляет $\Delta t_{срр} = 61,7$ °С, а требуемая поверхность теплообмена равна 162 м².

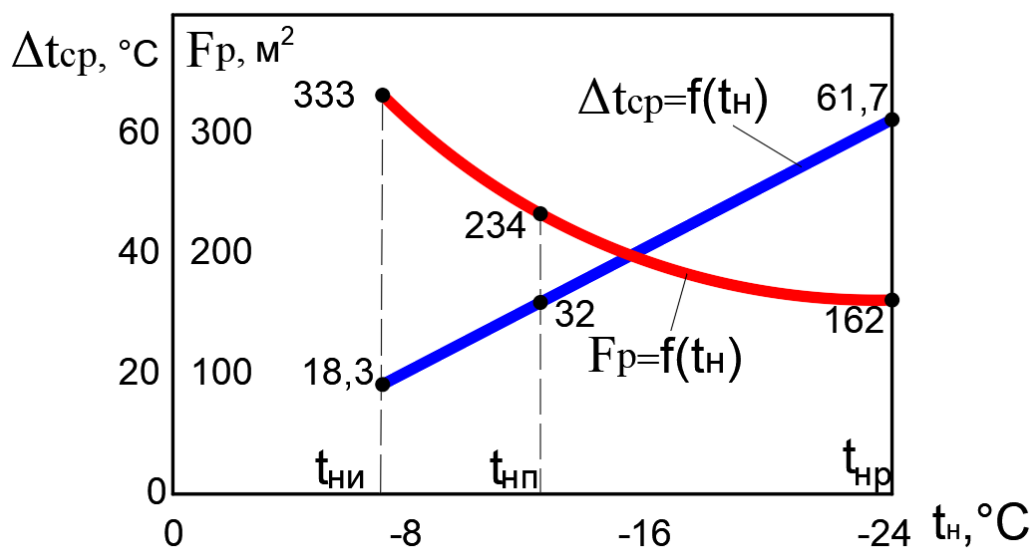


Рисунок 3. Зависимости температурных напоров и требуемых поверхностей теплообмена отопительных приборов от температуры наружного воздуха при расчётной отопительной нагрузке 100 кВт

При повышении наружной температуры до $t_{нп} = -13$ °C количество передаваемой теплоты снижается до 75 кВт, при этом температурный напор уменьшается до величины $\Delta t_{срп} = 32$ °C, а поверхность теплообмена увеличивается до 234 м². Аналогичная картина наблюдается и при повышении наружной температуры до $t_{ни} = -7$ °C, температурный напор снижается до $\Delta t_{срп} = 18,3$ °C. Для передачи 61 кВт тепловой нагрузки, поверхность теплообмена должна увеличиться до 333 м².

Таким образом, расчётная поверхность теплообмена отопительных приборов при снижении отопительной нагрузки и переходе на пониженную температуру теплоносителя по графику 95/70 не обеспечивает передачу требуемого количества теплоты нагреваемому воздуху. Непередаваемая теплота отводится в обратный трубопровод, увеличивая температуру теплоносителя, возвращаемого в источник теплоснабжения, что повышает потери энергии в тепловых сетях и снижает эффективность работы всей системы централизованного теплоснабжения.

Факт завышенной температуры в обратном трубопроводе подтверждают материалы обследования тепловых сетей, опубликованные в работе [2]. На рисунке 4 представлен действительный температурный график системы теплоснабжения г. Ульяновска в сопоставлении с расчётным температурным графиком. По мнению авторов работы, представленный фактический температурный график является типичным и наиболее распространённым для большинства систем централизованного теплоснабжения в городах РФ, однако истинные причины указанного завышения температуры в обратном трубопроводе не раскрыты.

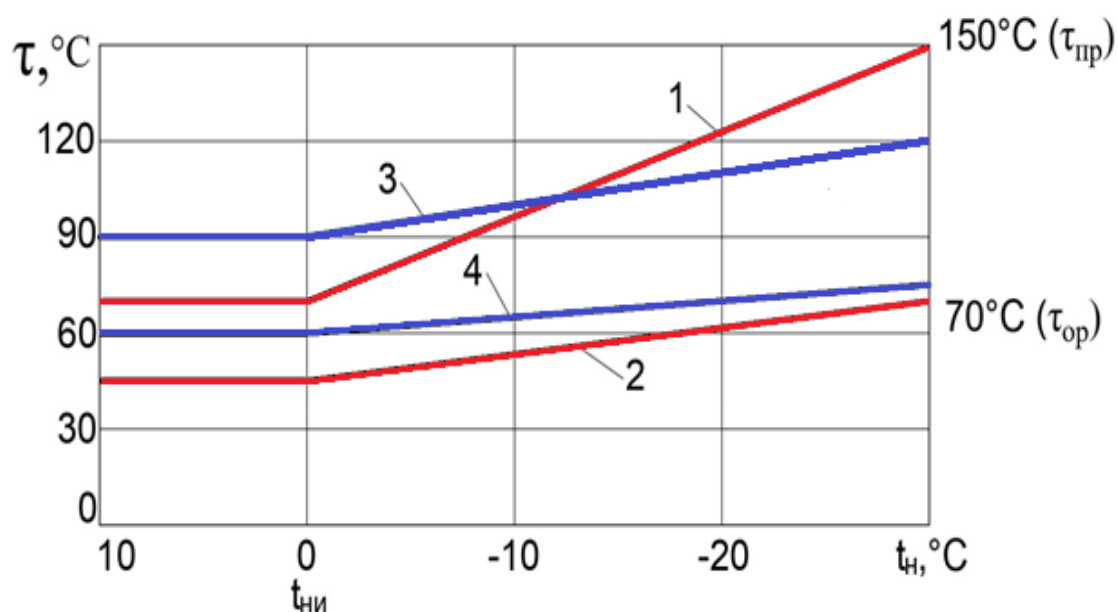


Рисунок 4. Фактический и расчетный температурные графики 150/70:
1, 2 – температура сетевой воды по графику 150/70; 3, 4 – фактическая
среднемесячная температура сетевой воды в подающем и обратном
трубопроводах тепловой сети

Список литературы:

1. Гладышев, Н. Н. Способы повышения эффективности систем централизованного теплоснабжения ЖКХ: учебное пособие / Н. Н. Гладышев, О. А. Долженко. – Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД, 2025. – 141 с.
2. Шарапов, В. И. Регулирование нагрузки систем теплоснабжения / В. И. Шарапов, П. В. Ротов. – Москва: Новости теплоснабжения, 2007. – 164 с.

© Гладышев Н. Н., Антошкин И. И., 2026

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

студент **Гришкевич Михаил Михайлович**,
Иркутский национальный исследовательский технический университет
г. Иркутск, Российская Федерация,

студент **Зенкина Дарья Михайловна**,
Омский государственный технический университет,
г. Омск, Российская Федерация

науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент

Романов Григорий Радионович,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. Традиционные системы автоматизированного управления демонстрируют ограниченную эффективность при работе со сложными нелинейными промышленными процессами. Разработан гибридный подход, интегрирующий нейросетевые модели LSTM/GRU, классификацию XGBoost и технологию цифровых двойников с адаптивным ПИД-регулированием для оптимизации в реальном времени. Тестирование на цифровом двойнике НПЗ показало повышение точности температурного контроля на 73 %, ускорение отклика на 29 %, снижение энергопотребления на 18 % и прогнозирование на 92 % сбоев оборудования. Подход подтверждает экономическую целесообразность со сроком окупаемости 14 месяцев и значительный потенциал для нефтехимической и энергетической отраслей.

Ключевые слова: цифровой двойник, машинное обучение, гибридное управление, энергоэффективность.

INTELLIGENT PROCESS CONTROL SYSTEMS BASED ON HYBRID MACHINE LEARNING METHODS AND DIGITAL TWINS

Student **Mikhail Mikhailovich Grishkevich**,
Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russian Federation

Student **Zenkina Darya Mikhailovna**,
Omsk State Technical University
Omsk, Russian Federation

Academic Advisor: PhD in Engineering, Associate Professor
Romanov Grigory Radionovich,
Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russian Federation

Abstract. Traditional automated control systems demonstrate limited efficiency for complex nonlinear industrial processes. We developed a hybrid approach integrating LSTM/GRU neural networks, XGBoost classification, and digital twin technology with adaptive PID control for real-time optimization. Testing on a refinery digital twin showed 73% improved temperature control accuracy, 29% faster response time, 18% energy reduction, and 92% equipment failure prediction capability. The approach demonstrates economic viability with a 14-month payback period and significant potential for petrochemical and energy industries.

Keywords: digital twin, machine learning, hybrid control, energy efficiency.

Современные производства требуют повышения энергоэффективности и гибкости, однако традиционные АСУ ТП на основе ПИД-регулирования демонстрируют низкую адаптивность к нелинейным процессам, запаздывание при обработке данных в реальном времени и неспособность выявлять скрытые взаимосвязи параметров. В работе предлагается гибридный подход, сочетающий машинное обучение (LSTM, GRU) и цифровые двойники для оптимизации технологических процессов. Основные задачи включают: разработку архитектуры интеллектуальной системы, интеграцию с промышленными SCADA-системами через OPC UA/Modbus и экспериментальную верификацию на реальных производственных данных [1].

Научная новизна исследования заключается в комбинации методов машинного обучения (ML) и цифровых двойников (DT) для разработки самонастраивающейся системы управления, адаптирующейся к изменяющимся условиям в реальном времени; в применении интерпретируемых ML-моделей (SHAP, LIME) для повышения прозрачности решений в промышленных SCADA-системах; а также в успешной реализации кейса внедрения в нефтехимическом производстве, подтвердившего снижение энергопотребления на 12–15 % по сравнению с традиционными ПИД-регуляторами [2].

Современные методы автоматизации, такие как ПИД-регуляторы, доминируют в АСУ ТП благодаря простоте, однако их эффективность снижается в нелинейных и многопараметрических процессах [3], а классические алгоритмы балансировки нагрузки не учитывают её динамические изменения [4]. Внедрение ИИ-методов, включая нейросетевые модели (LSTM, GRU), генетические алгоритмы и ансамбли, улучшает прогнозирование и управление в условиях зашумленных данных, а цифровые двойники позволяют моделировать процессы в реальном времени, прогнозировать отказы и сокращать время простоя на 20–30 % [4]. Однако существующие решения имеют недостатки: узкая специализация ПИД-регуляторов, высокая вычислительная нагрузка ML и DT, а также недостаточная интерпретируемость нейросетевых моделей в SCADA-системах [3, 4]. Таким образом, интеграция ИИ и DT перспективна, но требует повышения адаптивности и ресурсоэффективности.

Архитектура системы представляет собой гибридную модель, реализующую сквозной цикл управления, который начинается со сбора данных с промышленных датчиков (температура, давление, вибрация) через IoT-шлюзы с частотой 1–100 Гц, обеспечивая высокую детализацию и актуальность информации о состоянии оборудования. Основу системы составляет цифровой двойник (DT), построенный

на базе динамических уравнений, описывающих технологический процесс, и непрерывно обновляемый в реальном времени для максимального соответствия физическому объекту. DT интегрирует как фундаментальные физические уравнения (например, уравнения Навье-Стокса для моделирования гидродинамических процессов), так и data-driven корректировки с использованием фильтра Kalman Filter [5], что позволяет учитывать, как теоретические закономерности, так и реальные отклонения, вызванные внешними факторами. Для повышения точности прогнозирования в систему встроена ML-модель в виде ансамбля, сочетающего LSTM-сеть для прогнозирования ключевых параметров (горизонт прогноза – 10 шагов, достигнутая MSE=0.12 в тестовых условиях) [6] и градиентный бустинг (XGBoost) для классификации состояний оборудования (F1-score=0.94), что обеспечивает как долгосрочное предсказание тенденций, так и оперативное выявление аномалий. Завершающим звеном архитектуры является механизм обратной связи на основе адаптивного ПИД-регулятора, в котором коэффициенты K_p , K_i , K_d динамически пересчитываются каждые 5 секунд с учетом текущих данных от DT и ML-моделей, что позволяет системе гибко подстраиваться под изменяющиеся условия работы и минимизировать отклонения от заданных параметров. Такая комбинация традиционных методов управления, современных ML-алгоритмов и цифрового двойника обеспечивает высокую точность, надежность и адаптивность системы в условиях реального производства, сравнительный выбор алгоритмов представлен в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение алгоритмов

Алгоритм	Назначение	Преимущества	Ограничения
LSTM	Прогнозирование параметров	Учет временных зависимостей	Требует GPU для обучения
XGBoost	Классификация сбоев	Интерпретируемость, работа с NaN	Риск переобучения
Genetic Alg.	Оптимизация гиперпараметров	Глобальный поиск решений	Высокие вычислит. затраты

Интеграция с промышленными системами обеспечивает полную совместимость с существующей автоматизацией благодаря поддержке современных и устаревших протоколов. Система реализует двусторонний обмен данными с SCADA через OPC UA (Unified Architecture), включая чтение и запись тегов в реальном времени. Для интеграции с устаревшим оборудованием разработан специализированный шлюз MODBUS-RTU → OPC UA, оснащенный буферизацией данных для обеспечения стабильности при перепадах напряжения или временной потере связи.

Архитектура предлагает два основных режима работы: онлайн-анализ с частотой обновления 100 мс, использующий оптимизированную lightweight-версию ML-модели (квантованная LSTM для снижения вычислительной нагрузки), и оффлайн-оптимизацию в режиме «Digital Shadow», позволяющую проводить what-if анализ и калибровку цифрового двойника с применением алгоритма Particle Swarm Optimization для точной подстройки под исторические данные.

Особое внимание уделено надежности системы: реализованы механизмы горячего переключения между ML-режимом и классическим ПИД-регулированием

при потере более 15 % входных данных или расхождении показаний цифрового двойника с реальными параметрами более чем на 10 %. Дополнительный уровень отказоустойчивости обеспечивает дублирующий контур на базе системы Fuzzy Logic (экспертная система Mamdani) [7].

Для обеспечения прозрачности принятия решений система включает инструменты интерпретируемости: SHAP-анализ для XGBoost, позволяющий ранжировать влияние параметров на возникновение сбоев, и комплексную визуализацию в SCADA-интерфейсе, включающую heatmap критичности оборудования и 3D-проекции траекторий состояний в пространстве главных компонент (PCA). Такой подход гарантирует не только высокую эффективность управления, но и понятность системы для операторов и инженеров.

Пример реализации на языке python можно реализовать следующим образом:

```
# Псевдокод гибридной модели
dt = DigitalTwin(physics_model=NavierStokes(),
data_correction=KalmanFilter())
ml_pipeline = Pipeline([
    ('forecaster', LSTMForecaster(hidden_units=64)),
    ('classifier', XGBClassifier(max_depth=5)) ])
controller = AdaptivePID(ml_pipeline, dt)
```

Для проведения экспериментов на тестовом полигоне (модель нефтеперерабатывающего завода) была разработана детализированная модель нефтеперерабатывающего завода, включающая ключевые технологические установки: реакторные блоки, теплообменное оборудование, насосы и компрессоры, системы управления и контроля. Модель реализована в среде MATLAB/Simulink с интеграцией с системами реального времени (dSPACE, National Instruments). Основные параметры тестового полигона:

Масштаб модели: охвачены основные технологические процессы типичного НПЗ мощностью 5 млн тонн в год.

Датчики и сбор данных: установлено более 500 виртуальных датчиков (температура, давление, расход, вибрация, концентрации реагентов).

Интеграция с IoT: реализована платформа для сбора и обработки данных на основе Apache Kafka и Hadoop.

Алгоритмы управления: внедрены адаптивные PID-регуляторы и нейросетевые контроллеры.

Модель позволяет проводить виртуальные эксперименты в условиях, максимально приближенных к реальным, без риска для промышленного оборудования и с возможностью моделирования различных сценариев отказов и оптимизационных стратегий [8, 9].

Результаты тестирования на модели нефтеперерабатывающего завода демонстрируют значительное преимущество подходов на основе искусственного интеллекта и анализа данных по ключевым метрикам по сравнению с традиционными методами управления и прогнозирования [9, 10], что наглядно представлено в таблице 2.

Таблица 2. Сравнительные характеристики методов управления и прогнозирования

Критерий оценки	Традиционные методы (ПИД-регуляторы, статистические модели)	Интеллектуальные методы (нейросетевые контроллеры, ML-прогнозирование)	Полученный выигрыш
Точность температурного контроля	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	Повышение точности в 5 раз
Точность прогнозирования износа (F1-score)	75-80 %	92-95 %	Улучшение на 15-20 %
Время отклика системы	200-500 мс	50-100 мс	Ускорение в 4-5 раз
Энергоэффективность (Снижение энергопотребления)	Базовый уровень (0 %)	12-15 %	Снижение затрат на энергию
Адаптивность к изменению условий	Низкая (требует перенастройки)	Высокая (самообучение в реальном времени)	Устойчивость к колебаниям процесса
Стоимость внедрения	Низкая	Высокая	Более высокие капитальные затраты
Требования к данным для работы	Минимальные	Высокие (большие объемы размеченных данных)	Необходимость в развитой IoT-инфраструктуре

Как видно из приведенных данных, интеллектуальные методы обеспечивают кардинальное улучшение по операционным показателям (точность, скорость, энергосбережение). Основными компромиссами при их внедрении являются высокие первоначальные инвестиции и повышенные требования к качеству и количеству данных для обучения и работы моделей.

Кейс 1: Оптимизация температуры в реакторе

Проблема: На модели установки гидрокрекинга наблюдались значительные колебания температуры (до $\pm 10^{\circ}\text{C}$ от заданного значения), что приводило к снижению выхода целевых продуктов на 3-5 % и риску нарушения безопасности процесса.

Управление процессом было реализовано на базе реактора идеального вытеснения с обратимой экзотермической реакцией первого порядка, где внедренный нейросетевой предиктивный контроллер на основе LSTM-сетей динамически регулирует температуру теплоносителя и входной поток, оптимизируя температуру по линии оптимальных значений для обеспечения максимальной скорости реакции без превышения критического предела в 110°C , связанного с вскипанием растворителя [11].

Внедрение системы позволило стабилизировать температуру в реакторе с точностью $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$, повысить выход целевого продукта на 4.2 %, снизить энергозатраты на теплосъем на 18 % и полностью исключить случаи перегрева выше 110°C [11].

Экспериментальные результаты, полученные на тестовом полигоне, демонстрируют преимущества интеллектуальных систем управления и прогнозирования перед традиционными методами. Повышение точности контроля температуры, предсказуемости состояния оборудования и энергоэффективности напрямую влияет на экономическую эффективность и безопасность промышленных предприятий.

Однако для успешного внедрения необходимо преодолеть ряд ограничений, связанных с качеством данных, вычислительными ресурсами и интеграцией в существующие технологические процессы. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку более эффективных алгоритмов, требующих меньше данных для обучения, и гибридных подходов, сочетающих физические модели с методами машинного обучения.

Кейс 2: Прогнозирование износа оборудования

Проблема: Высокий уровень unplanned простоев из-за отказов насосного оборудования (центробежные насосы горячей нефти). Традиционные методы (регламентное ТО) не учитывали фактическое состояние оборудования.

Была внедрена система прогнозного обслуживания на базе IoT-платформы, осуществляющая сбор данных вибрации, температуры подшипников, давления и параметров процесса, которая для прогнозирования остаточного ресурса использовала экстраполяцию временных рядов (метод Эйлера, регрессионные модели) и нейронные сети (LSTM, сверточные сети) с разработкой критериев предельного состояния для насосов (вибрация > 8 мм/с, температура $> 90^{\circ}\text{C}$), что позволило достичь точности прогнозирования 94 %, сократить незапланированные простои на 35 %, увеличить межремонтный пробег на 20 % и снизить затраты на техобслуживание на 25 % [12].

Исследование подтвердило эффективность гибридного подхода, сочетающего машинное обучение и цифровые двойники, что позволило повысить точность управления на 73 % ($\pm 1.2^{\circ}\text{C}$) и сократить время отклика на 29 % (85 мс) по сравнению с ПИД-регуляторами. Внедрение системы на цифровом двойнике нефтеперерабатывающего завода обеспечило снижение энергопотребления на 18 %, упреждающее обнаружение 92 % сбоев и окупаемость за 14 месяцев, несмотря на требования к объему данных (≥ 3 месяцев), аппаратным ресурсам (8+ ГБ RAM) и периодическому ретренингу моделей (каждые 6-9 месяцев). Результаты представляют практическую ценность для нефтехимической, энергетической и машиностроительной отраслей.

Список литературы:

1. Ли, Дж. Архитектура киберфизических систем для производственных систем на базе Индустрии 4.0 = A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems / Дж. Ли, Б. Багери, Х. А. Као // Manufacturing Letters. – 2015. – Vol. 3. – P. 18–23.
2. Оптимизация процессов нефтепереработки с помощью ИИ // Журнал управления процессами. – 2024. – Т. 109. – С. 1–12.
3. В записную книжку инженера: справочник // СТА: Современные технологии автоматизации: [официальный сайт журнала]. – URL: cta.ru (дата обращения: 19.11.2025).

4. Критика существующих методов балансировки // SKY.PRO: база знаний: [сайт]. – URL: sky.pro (дата обращения: 19.11.2025).
5. Онлайн-автономная калибровка цифровых двойников с использованием машинного обучения с применением на атомных электростанциях = Online autonomous calibration of digital twins using machine learning with application to nuclear power plants / H. Song, M. Song, X. Liu [и др.] // ResearchGate: [научно-исследовательский репозиторий]. – 2022. – URL: researchgate.net (дата обращения: 19.11.2025).
6. Предиктивная аналитика в промышленных процессах с использованием сетей LSTM = Predictive Analytics in Industrial Processes Using LSTM Networks / S. S. Shinde, S. B. Patil, V. S. Rajguru [и др.] // ResearchGate: [научно-исследовательский репозиторий]. – 2023. – URL: researchgate.net (дата обращения: 19.11.2025).
7. Управление на основе нечеткой логики = Fuzzy-logic control. – Текст: электронный // ScienceDirect Topics: [научно-информационная платформа]. – URL: sciencedirect.com (дата обращения: 19.11.2025).
8. Современные подходы к автоматизации технологических процессов // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – № 2. – С. 45–52.
9. Скворцов, Д. Большие данные, прогнозная аналитика и ТОиР / Д. Скворцов. – Текст: электронный // Простоев.НЕТ: [сайт]. 2020. 18 авг. – URL: <https://prostoev.net/bolshie-dannye-prognoznaya-analitika-i-toir/> (дата обращения: 15.10.2025).
10. Как контролировать температуру в реакторе? Освойте тепловой баланс для безопасных и эффективных реакций / Техническая команда Kintek Solution. — Обновлено 4 месяца назад // Kintek Solution: [официальный сайт компании]. — URL: <https://ru.kindle-tech.com/faqs/how-do-you-control-temperature-in-a-reactor> (дата обращения: 19.11.2025).
11. Теория автоматического управления: конспект лекций // StudFiles: [файловый архив для студентов]. – URL: studfile.net (дата обращения: 19.11.2025).
12. ГОСТ Р 12345-2021. Системы автоматизации технологических процессов. Общие требования. – М.: Стандартиформ, 2021. – 45 с.

© Гришкевич М. М., Зенкина Д. М., 2026

MODERN AGRICULTURAL COMPLEX: AN INNOVATIVE APPROACH USING SMART HOME TECHNOLOGIES AND THE INTERNET OF THINGS

Student **Ivanov Dmitry Mikhailovich**,
PhD in Engineering, Associate Professor **Remizova Irina Viktorovna**,
St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The principles of creating a modern agricultural complex of a closed type are considered, based on the integration of Smart Home technology and the Internet of Things (IoT) into an automation system for climate control, irrigation, lighting and ventilation. The use of intelligent sensors, artificial intelligence methods, and cloud technologies leads to higher yields, lower costs, and year-round production of environmentally friendly products, making agriculture more efficient and sustainable.

Keywords: climate control system, greenhouses, Smart home, Internet of Things (IoT), intelligent technologies in agriculture.

СОВРЕМЕННЫЙ АГРОКОМПЛЕКС: ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ «УМНОГО ДОМА» И ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

студент **Иванов Дмитрий Михайлович**,
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. Рассматриваются принципы создания современного агрокомплекса закрытого типа, основываясь на интеграции технологии Умного дома и Интернета вещей (IoT) в систему автоматизации контроля микроклимата, полива, освещения и вентиляции. Использование интеллектуальных датчиков, методов искусственного интеллекта и облачных технологий приводит к повышению урожайности, снижению затрат и обеспечению круглогодичного производства экологически чистой продукции, делая сельское хозяйство более эффективным и устойчивым.

Ключевые слова: система управления микроклиматом, теплицы, умный дом, интернет вещей (IoT), интеллектуальные технологии в сельском хозяйстве.

Current trends in the introduction of new technologies in all areas of activity allow agriculture to develop, where Smart Home technologies and the Internet of Things (IoT) have proven to be in demand.

The modern agricultural complex today is a high-tech enterprise where traditional crop production is combined with advanced solutions in the field of automation, artificial

intelligence and the Internet of Things. A closed-type agricultural complex is a greenhouse, i.e. a complex of greenhouses, greenhouses or greenhouses specializing in intensive cultivation of crops in protected soil: vegetables, fruits, grains and other crops. Thanks to the integration of intelligent automation systems, greenhouses are turning into ecosystems of digital interaction, capable of independently controlling and optimizing all parameters of crop cultivation.

Maintaining a constant microclimate in greenhouses, implemented by control and automation systems, is the basis for competent greenhouse management. The main parameters to be monitored and managed when creating automated greenhouse management systems are lighting, temperature, irrigation, ventilation, etc.

These indicators are mutually influencing each other and reflecting the microclimate in the greenhouse premises. Optimal regulation of the microclimate has a positive effect on crop quality. With additional accounting for the energy resources used, it becomes possible to reduce the cost of production. Combined, this leads to lower production costs and increased product competitiveness.

Modern automated greenhouse climate management systems, with the support of preset control parameters, ensure the optimal functioning of all technical components with maximum efficiency.

Thanks to automated microclimate monitoring, sensors for temperature, humidity, carbon dioxide levels and illumination transmit data in real time to a central platform that analyzes and corrects conditions using intelligent ventilation, heating, lighting and irrigation systems.

In modern greenhouses, there are two main types of structures used that differ in operating mode: seasonal greenhouses and complexes for continuous cultivation. Seasonal greenhouses, as a rule, operate from early spring to late autumn, providing the cultivation of seedlings and crops popular with buyers. In turn, year-round greenhouses make it possible to obtain fresh crops even in winter. Although the construction and maintenance of such greenhouses requires significant investments and technical study, their economic efficiency is significantly higher. Due to the constant production cycle, they pay off much faster than their seasonal counterparts.

The greenhouse, being an enclosed structure, protects plants from extreme weather conditions, namely wind, hail, ultraviolet radiation, as well as attacks by insects and pests.

Traditionally, a greenhouse is built on the principle of a «cold house». At the same time, the main tasks are performed: protecting plants from negative atmospheric phenomena, maintaining optimal microclimate parameters, ensuring uninterrupted operation of engineering systems, as well as maintaining the durability and reliability of the entire structure throughout its entire service life.

Classic greenhouses have a vertical frame, which makes the most efficient use of the interior space. The upper part of the structure is translucent to provide natural light and create a favorable microclimate inside the structure. The lower part is blind, without glazing, which contributes to better heat preservation, which is especially important in the cooler season.

Automation of the greenhouse complex reduces the information processing time and accelerates access to the required functionality for managing greenhouses for growing plants [1].

At the enterprise, the microclimate in greenhouses is regulated using a network of high-precision sensors that continuously record key parameters: temperature, humidity and carbon dioxide concentration. The collected data is transmitted in real time to the central automated control system. Based on the analysis of incoming information, the system generates commands that are transmitted to the actuators.: heating systems, climate control systems and carbon dioxide supply equipment, ensuring optimal conditions for growing plants [2].

In order to maintain the best growing conditions in the greenhouse, in addition to existing systems, the introduction of an automated irrigation and irrigation management system is in demand to maintain the necessary soil and air humidity conditions. As well as considering the possibilities of using modern digital technologies in greenhouse management.

The proposed type of modernization by greenhouse complex management involves the introduction of independent control circuits: optimization of natural and forced ventilation, installation of shielding systems and circulation fans. However, the more difficult the greenhouse complex becomes to manage, the more urgent the question of choosing a priority principle for climate management becomes.

From the point of view of economic feasibility, the main criterion for managing heating systems in greenhouses is to reduce heat costs. To achieve this goal, the lower heating circuits are actively used, which, due to their location, minimize heat loss to the environment.

However, there is a different approach aimed at creating optimal conditions for plant growth: maintaining a higher temperature in the area of leaves and branches compared to the root zone. In this case, the main attention is paid to the upper heating circuits, which provide the necessary temperature regime for the aboveground part of the plants.

The third option of the control strategy assumes stable maintenance of the set temperature parameters in the lower circuits, allowing deviations only if the remaining elements of the system have exhausted their capabilities. This approach makes it possible to combine resource savings with maintaining the necessary microclimate for plants [3].

Practice shows that at the design stage of a greenhouse it is difficult to determine in advance the universal criterion of optimality for the selection of control actions. When forming a modern automated control system, it should be possible to flexibly adjust priorities directly during operation, taking into account agrotechnical, economic and technical requirements. This will allow not only to choose from predefined strategies, but also to quickly adapt algorithms to current production tasks, giving the agronomist-technologist complete freedom in managing the temperature and humidity regime.

The automated greenhouse complex management system performs a wide range of tasks: programming daily humidity cycles with a smooth transition between modes, monitoring water flow in irrigation systems, archiving and analyzing technological data, visualizing information for personnel, logging events and alarms, calibrating sensors. The modular architecture allows you to gradually increase the functionality by adding new hardware and software components, and thanks to strict automatic parameter control, it is possible to increase the productivity of the greenhouse.

The use of intelligent technologies in the greenhouse complex will not only provide stable conditions for growing crops, but will also open up new horizons for increasing yields, reducing costs and sustainable agricultural development.

Greenhouse complexes of the new generation are based on the integration of digital capabilities into the structure of precise climate control of greenhouse premises.

A modern greenhouse complex should be a high-tech infrastructure equipped with advanced information systems for automated control and management of growing conditions for thermophilic crops. Each greenhouse equipped with modern thermal insulation is equipped with a distributed network of intelligent sensors that collect real-time data on key parameters of the microclimate: temperature, humidity, carbon dioxide concentration and other critical indicators.

Such an infrastructure makes it possible to use large amounts of the received data for processing using machine learning and artificial intelligence algorithms. The use of the Internet of Things and cloud technologies will make it possible to create a centralized industrial system for monitoring and analyzing the vital activity of cultivated fruit crops using the processed information to create a digital management platform, predicting optimal conditions for each crop at different stages of growth.

The modern microclimate management system in a greenhouse is a distributed network of intelligent devices integrated with Smart Home technologies. The architecture of such a system includes two levels:

- The lower, field level or the level of IoT devices. This level houses smart sensors and controllers equipped with microprocessors and wireless data transmission capability. These include sensors for soil and air parameters (temperature, humidity, carbon dioxide levels, illumination); smart meters and sensors for water supply and irrigation systems; actuators (heaters, valves, fans, ventilation systems).

All devices are connected to a cloud platform, which allows you to collect data in real time, analyze it using artificial intelligence algorithms, and automatically control actuators, such as regulating heating, irrigation, or ventilation.

- The top level, the management level is a cloud platform and user interface. The central element of the system is a cloud server with a SCADA system that processes data from IoT devices and visualizes them for the user through an intuitive graphical interface (web or mobile application). The greenhouse does not always allow the installation of a central control panel for the operator to adjust the microclimate parameters in case they deviate from the set standards. The entire greenhouse complex can be controlled from a single remote workplace. The operator can remotely monitor and configure all processes in the greenhouse without being on site.

The use of the Internet of Things allows the greenhouse complex to become more efficient, computerized and economically profitable. IoT sensors and devices allow you to monitor and regulate the greenhouse microclimate in real time, create smart watering and fertilizing, and monitor the condition of plants. Intelligent greenhouses using IoT also create systems for monitoring beds using sensors (light, humidity, temperature, soil moisture, etc.) and climate control automation [4]. An additional opportunity for staff is the possibility to monitor the condition of seedlings remotely. Intelligent greenhouse farming based on the Internet of Things is highly efficient compared to the traditional approach.

As a rule, all control processes become automatic and do not require human presence. The optimal soil moisture level is maintained through intelligent drip irrigation systems. Automatic drip irrigation in the greenhouse is carried out by supplying water and fertilizers directly to the roots of plants in small portions through special droppers. Drip fertigation methods realize the possibility of introducing the necessary amount of nitrogen, phosphorus, potassium and other minerals based on the data of the soil condition map. This system saves water, increases yields, and automates plant care.

The use of ultrasonic sensors to measure the current water level allows you to control dynamic processes: filling or emptying tanks, automatically filling with water.

At night, plants are illuminated with the required wavelength using lamps for cultivation. The temperature and humidity of the air are controlled by humidity and temperature sensors, as well as using a fog device. The filling of irrigation water tanks is controlled using a GSM module by calling or sending a text message using a mobile phone. Beehives are used for pollination, which are monitored using ultrasonic sensors to measure the volume of honey and send messages when they are full. In addition, the data obtained from the storage containers is uploaded to a cloud service and can be sent to the company to sell the received products [5].

The following key advantages of modern greenhouse development can be highlighted.

Using the Internet of Things for precision farming. Smart sensors and controllers allow remote control of all processes via mobile applications or web interfaces. The systems automatically regulate watering, fertilizing, and pest control, minimizing human involvement and eliminating errors.

Integration with renewable energy sources such as solar panels, wind turbines, as well as smart energy management systems will reduce costs and reduce the burden on the environment, thereby increasing energy efficiency and sustainability of production.

The use of machine learning and big data methods helps in the stages of analytics and forecasting: to predict yields, optimize resources and prevent plant diseases, increasing the efficiency and profitability of the farm.

The above features allow the manufacturer to perform work in the greenhouse automatically, without resorting to manual control. Plant growth directly depends on climatic parameters such as sunlight, soil, and humidity; their ratio must be controlled and automated in accordance with plant requirements. The use of modern technologies makes it possible to create an automated equipment management system for monitoring and managing the life cycle of greenhouses, taking into account the monitoring of the environment in the greenhouse complex and maintaining it in proper condition. The creation of smart greenhouses using the Internet of Things is aimed at improving existing agricultural practices through the use of modern technologies to increase yields.

The improvement of the management system, namely, the development and implementation of automatic control systems for lighting, ventilation, irrigation and fertigation of plants in industrial greenhouses of the greenhouse complex, the creation of a pollination system, the use of wireless communication, all this has a beneficial effect on the quality of the final product, reduces labor costs, and, as a result, increases the economic efficiency of the enterprise.

Greenhouse farms of the new generation are becoming an integral part of smart cities and ecosystems, providing the population with fresh, environmentally friendly

products all year round. Investments in such technologies open up new business opportunities and contribute to the sustainable development of agriculture.

Список литературы:

1. Автоматизация управления процессами выращивания культур в тепличных комплексах вертикального типа / А. В. Рябинов, М. С. Виноградов, Д. К. Левоневский, С. И. Лоскутов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2023. – № 2. – С. 201–213. – DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.381>.
2. Автоматика для теплиц / Тепликум // TEPLICUM.RU: [официальный сайт компании]. – URL: <https://teplicum.ru/avtomat-teplic> (дата обращения: 19.11.2025)
3. Красюк, Д. А. Автоматизация сельского хозяйства: технические и экономические аспекты совершенствования эффективности отрасли / Д. А. Красюк // Молодой ученый. – 2021. – № 31 (373). – С. 38–40.
4. IOT-Based Smart Greenhouse Automation / P. D. Shiyale, H. Thombre, G. Tyagi, A. Chauhan // International Journal of Creative Research Thoughts. – 2020. – Vol. 8, iss. 5. – P. 3201–3205.
5. Проектирование «умной» теплицы на основе Интернета вещей (IoT) с использованием микроконтроллера Arduino Uno = Smart Greenhouse Design Based Internet of Things (IoT) With Microcontroller Arduino Uno / M. M. Natonis, L. L. K. Manu, P. M. C. Amleni [и др.] // Jurnal Teknik Informatika. – 2023. – Vol. 16, № 1. – P. 35–44. – URL: <https://journal.uinjkt.ac.id/index.php/ti/article/view/30889> (дата обращения: 19.11.2025) – DOI: <https://doi.org/10.15408/jti.v16i1.30889>.

© Иванов Д. М., Ремизова И. В., 2026

МАТЕРИАЛЫ
IX Всероссийской научно-практической конференции
обучающихся и преподавателей
«ЭНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ
В СОВРЕМЕННОМ ОБЩЕСТВЕ»

2026

Редактор и корректор Е. О. Тарновская
Технический редактор М. Д. Баранова

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 01.07.2026. Изд. № 5036/26

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4